ENERGIA NEGATIVA • ISLAS DE ESTABILIDAD • NARCOLEPSIA

INVESTIGACION y CIENCIA

MARZO 2000
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



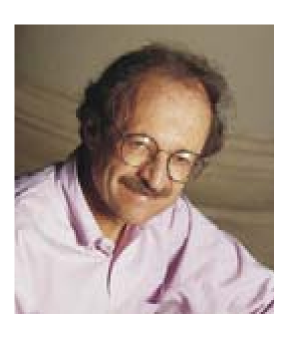
Homínidos coetáneos

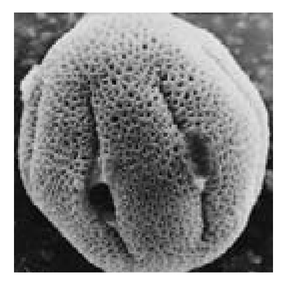
9 770210 136004 00282



Marzo de 2000 Número 282

SECCIONES













Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Kazuhiko Sano

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Slim Films; Dan Wagner (*Times Square*); Julia Waterlow (*Sahara*)
6	Lisa Burnett
7-8	Michael Goodman
9	Michael Goodman, fuente: Chad Clark, William A. Hiscock y Shane L. Larson
10	Lisa Burnett
11	Michael Goodman
14-17	Jay H. Matternes
18	Patricia J. Wynne (*dibujos*)
20	Erica Lansner
21	Dusan Petricic
22	Yuri Gripas
23	Laurie Grace
24	Yuri Gripas
25	Laurie Grace
38-39	Glen Allison; cortesía de Paul F. Hoffman (*derecha, arriba*)
40	Heidi Noland; cortesía de Daniel P. Schrag (*abajo*)
41	Cortesía de Galen Pippa Halverson (*izquierda*); cortesía de Daniel P. Schrag (*derecha*)
42-43	David Fierstein
44	Heidi Noland
46	James Aronovsky (*secuencia del perro*); Joel Deutch (*secuencia humana*); Slim Films
48	Dusan Petricic, sobre un dibujo de la Asociación Americana de Narcolepsia
49	Terese Winslow
50	Laurie Grace; Jerome M. Siegel (*fotografía*)
52-59	José María Valpuesta, Oscar Llorca y Sergio Marco
60-61	Attila Hejja
62	George Retseck
63	Laboratorio Lawrence de Livermore
64	George Retseck
66-70	Zbigniew Kość
71	Krzystof Białkowski a partir de un esbozo de Marek Puszkarski (*abajo*)
72-75	Zbigniew Kość
76	Photo Researchers, Inc.
77	Sarah Donelson
78-79	Sarah Donelson (*gráficas*); Steve Starr, Robbie McClaran y Johan Gunseus/SABA (*fotografías*)
80	B. Daemmrich
82-83	Daniels & Daniels
84	Johnny Johnson
86-87	Bryan Christie
88	Dusan Petricic
96	Bryan Christie

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Miguel Alcubierre: *¿Qué es la energía negativa?*; Carlos Lorenzo: *Homínidos contemporáneos*; Juan P. Campos: *Islas de estabilidad* y *Saqqara y su tumba del visir*; Manuel Puigcerver: *La Tierra, una bola de nieve*; Juan Carlos Rodríguez Rubio: *Narcolepsia*; Luis Bou: *Enseñanza de las ciencias* y *Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Perfiles* y *Nexos*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

Ciencia y sociedad: María José Báguena: *Innovación quirúrgica*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Senior Associate Editor*; Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette, *Editors;* Graham P. Collins; Marguerite Holloway y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION William Sherman
CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S. A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

LA BOMBA DE HIDRÓGENO. «Aspectos técnicos a considerar acerca de la bomba de hidrógeno: Primero, puede fabricarse. Segundo, no puede ser menor que una bomba de fisión, pues emplea una de éstas como detonador; el tamaño quizá sea muchas veces, acaso miles de veces, mayor. Tercera, si bien la fisión es susceptible de un control metódico para obtener una energía utilizable en un reactor, la reacción de fusión no ofrece por el momento otra perspectiva de uso que las explosiones. Se ha tomado la decisión de fabricar la superbomba y, dado el marco actual de intensos miedos y recelos nacionalistas en el que vivimos, cabe suponer que la decisión es acertada; o sea, he aquí la carrera de armamentos.» [*Nota de la Redacción: La primera bomba fue detonada el primero de noviembre de 1952 en el atolón de Eniwetok.*]

NEUROSIS EXPERIMENTALES. «Las aberraciones neuróticas pueden originarse cuando los patrones de conducta entran en conflicto por necesidades incompatibles o porque éstas no pueden coexistir en tiempo y espacio. Se indujo experimentalmente en los gatos la neurosis, adiestrándoles a obtener la pitanza con el movimiento de un interruptor que depositaba una bola comestible en el cajón. Tras haberles habituado a conseguir así la comida, se les lanzaba un suave e inocuo chorro de aire al morro cuando alzaban la tapa del cajón. Mostraron entonces los gatos signos de indecisión neurótica al acercarse al interruptor. Algunos evidenciaron actitudes neuróticas. Otros perdieron interés por los ratones. Uno intentó acurrucarse en las paredes de la jaula.»

...cien años

CAMPOS MAGNÉTICOS Y RADIACIÓN. «Monsieur Becquerel ha dado cuenta de un curioso fenómeno ante la Academia de Ciencias de París. Ha descubierto que, colocando una sustancia radiactiva entre los polos de un electroimán muy potente, la radiación emitida cambia de dirección. Uno de sus experimentos lo efectuó con dos discos de hierro dulce situados entre las piezas polares de un electroimán. Junto al centro de uno de los discos depositó la sustancia radiactiva, que contenía radio, el elemento recién descubierto. Sobre el otro disco dispuso una pantalla fluorescente. Al excitar el electroimán, la fosforescencia excitada en la pantalla se contrajo en una mancha mucho más intensa.»



Auxilio a la navegación: un buque faro alimentado por electricidad y movido por vapor

LUCES MARINAS. «A pocas millas de la costa del cabo Hatteras se hallan los temidos Bajíos del Diamante, sobre los que tantos intentos fracasados se han hecho para levantar un faro. La única manera de proteger a la navegación en ese cementerio marino es anclar en un banco un buque faro capaz de enfrentarse a la durísima meteorología local. Ya se diseñó esa embarcación y su terminación está próxima en los astilleros de la Fore River Engine Company, de Massachusetts. Es de propulsión por vapor e iluminación eléctrica. Las luces, tres en cada mástil, serán de 100 candelas y 100 volt cada una.»

TORRENTERAS DE AGUANIEVE. «La reciente anulación como reserva forestal de los bosques de Medicine Bow se debe a los esfuerzos de algunos agricultores del norte de Colorado. Mientras que la destrucción de los bosques no ha supuesto una diferencia apreciable en la pluviometría, sí se ha traducido en una novedad importante en los arroyos de montaña. Al no estar los lechos de nieve protegidos de los rayos solares por un espeso abrigo de ramas de pino, cuando llega la primavera la nieve se funde muy deprisa y llena los cauces de torrentes tumultuosos cuyo volumen no es posible controlar adecuada y económicamente mediante el actual sistema de canales y presas.»

...ciento cincuenta años

DESPIERTOS Y DEMENTES. «El doctor Brigham, del manicomio de Nueva York, expresa la opinión de que la causa inmediata y más frecuente de la demencia estriba en la falta de sueño. ‘El apetito se desata, disminuyen las secreciones y no tardan en aparecer sueños en plena vigilia con otros raros fantasmas. Al principio puede tratarse de un episodio transitorio, pero termina por adueñarse de la mente, con el resultado de locura o muerte.’»

¿Y LA TRANQUILIDAD? «A comienzos de este año se hallaba en Ohio e Indiana. El año pasado en el territorio de Minnesota. El año que viene habrá que buscarla en Nebraska y en torno a los lagos de Woods. Donde quiera que vaya el buque de vapor, desaparece la paz de la naturaleza.»

¿Qué es la energía negativa?

La creación de agujeros de gusano y otras configuraciones alojadas hoy en el reino de la fantasía requeriría una forma insólita de energía. Para nuestro infortunio, las mismas leyes de la física que permiten la existencia de esta "energía negativa" limitan también su comportamiento

Lawrence H. Ford
y Thomas A. Roman

¿Puede una región del espacio contener menos que nada? Con sentido común, diríamos que no. A lo máximo, cabe detraer toda la materia y toda la radiación y dejar el vacío. Pero la física cuántica tiene una habilidad acrisolada, la de confundir la intuición, y no nos hallamos ante ninguna salvedad. Resulta que sí, que una región del espacio puede contener menos que nada. Su contenido de energía por unidad de volumen —la densidad de energía— puede ser menor que cero.

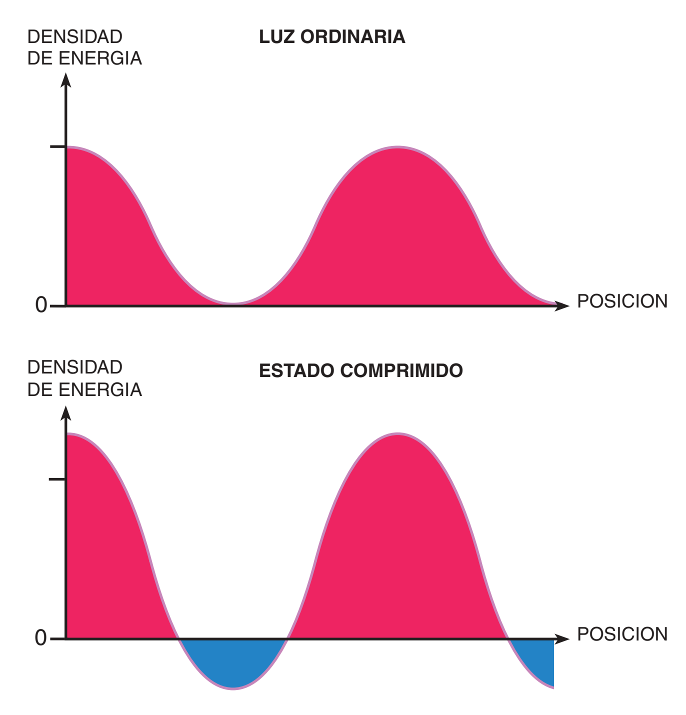
No necesitamos insistir en que semejante hecho acarrea consecuencias muy extrañas. De acuerdo con la relatividad general, la teoría einsteiniana de la gravitación, la presencia de materia y energía deforma la estructura geométrica del espacio y del tiempo. Lo que percibimos como fuerza de gravedad es distorsión del espacio-tiempo producida por materia común y corriente, con energía positiva. Pero cuando el espacio-tiempo se deforma por materia con energía negativa —"materia exótica"—, entonces pueden volverse posibles todo tipo de fenómenos extraños: agujeros de gusano, que pueden atravesarse, convertidos así en túneles hacia regiones remotas del universo; la propulsión a distorsión ("warp drive"), que permitiría viajar más rápido que la luz, y máquinas del tiempo, que nos llevarían al pasado. La energía negativa podría incluso utilizarse para construir máquinas de movimiento perpetuo o para destruir agujeros negros.

Cuando los físicos oyen hablar de esa clase de posibilidades se les saltan las alarmas. Las paradojas





1. SI EXISTIERA UN AGUJERO DE GUSANO, se nos mostraría como apertura esférica al cosmos. En esta fotografía trucada de la neoyorquina calle de Times Square, el agujero de gusano permite a los peatones caminar al desierto del Sahara en un solo paso, librándose de las horas de avión hasta Tamanrasset. Aunque el agujero de gusano no viola ninguna de las leyes conocidas de la física, requeriría cantidades inverosímiles de energía negativa.



2. LAS ONDAS DE LUZ tienen una densidad de energía positiva o cero en diferentes puntos del espacio (*arriba*). Si hablamos de estados comprimidos, la densidad de energía en un instante temporal puede ser negativa en algunos sitios (*abajo*). Para compensar, el pico de la parte positiva debe ser mayor.

potenciales de un viaje al pasado —en que se mata al abuelo antes de la concepción del padre— han sido pasto de las novelas de fantasía científica. Pero no están exentas de problemas las demás consecuencias de la existencia de la materia exótica e instan una pregunta decisiva: las leyes de la física que permiten la existencia de la energía negativa, ¿son acaso las mismas que establecen algún tipo de límites en su comportamiento? Hemos descubierto, aunque no sólo nosotros, que la naturaleza impone restricciones estrictas en la magnitud y la duración de la energía negativa; restricciones tales que tornan extremadamente improbable la construcción de agujeros de gusano y de propulsores a distorsión.

Doble negativo

Antes de proseguir, conviene dejar sentado qué no es la energía negativa. De entrada, no debemos confundirla con la antimateria, que tiene energía positiva. Cuando un electrón y su antipartícula —un positrón— chocan, se aniquilan. De la colisión resultan rayos gamma, que llevan energía positiva. Si las antipartículas estuviesen constituidas por energía negativa, una interacción de ese tipo daría como resultado cero energía. Tampoco hemos de confundir la energía negativa con la energía asociada a la constante cosmológica, postulada en los modelos inflacionarios del universo [*véase* "Antigravedad cosmológica", por Lawrence M. Krauss; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1999]. Dicha constante representa presión negativa, pero energía positiva. (Algunos autores la llaman también materia exótica; nosotros preferimos reservar esa expresión para densidades de energía negativas.)

Pero la idea de energía negativa tampoco es una ensoñación fantástica. Algunos de sus efectos se han producido en el laboratorio. Tienen su origen en el principio de incertidumbre de Heisenberg, que requiere que la densidad de energía de cualquier campo eléctrico, magnético o de otro tipo, fluctúe estocásticamente. Incluso cuando la densidad de energía es cero en promedio, como es el caso en el vacío, debe continuar fluctuando. Por esa misma razón el vacío cuántico nunca puede estar realmente vacío, en el sentido clásico del término; antes bien, se parece a un mar alborotado de partículas "virtuales" que aparecen y desaparecen de forma espontánea [*véase* "Aprovechamiento energético del punto cero", por Philip Yam; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1998]. En la teoría cuántica, el concepto usual de energía cero corresponde en realidad a un vacío con todas esas fluctuaciones. Si se lograra reducir la amplitud de las fluctuaciones, el vacío tendría menos energía de la que tiene normalmente, es decir, tendría una energía menor que cero.

A modo de ejemplo de dicho fenómeno, los expertos en óptica cuántica han creado estados especiales del campo electromagnético en que los efectos de interferencia destructiva cuántica suprimen las fluctuaciones del vacío. Tales estados de vacío comprimido, así se les conoce, involucran energía negativa. Expresado con mayor rigor, están asociados con regiones de energía positiva alternante con energía negativa. La energía total promediada sobre todo el espacio permanece positiva; los estados de vacío comprimido producen energía negativa en un lugar a costa de producir energía positiva extra en otros sitios. El experimento arquetípico consiste en rayos láser que atraviesan cuerpos con propiedades ópticas no lineales [*véase* "Luz comprimida", Richard E. Slusher y Bernard Yurke; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1988]. Los rayos láser, intensos, provocan que el material cree pares de cuantos de luz; estos fotones incrementan y suprimen, en vaivén alterno, las fluctuaciones del vacío y dan origen a regiones de energía positiva y negativa, respectivamente.

Se produce también energía negativa mediante el levantamiento de fronteras geométricas en el espacio. En 1948, Hendrik B. G. Casimir, físico holandés, mostró que dos placas metálicas paralelas y sin carga eléctrica podían alterar las fluctuaciones del vacío, de suerte tal que ejercen una fuerza de mutua atracción. Los cálculos posteriores mostraron que la densidad de energía entre las placas resultaba negativa. En efecto, la presencia de las placas reduce las fluctuaciones del vacío en el espacio entre ellas; esto crea una región con energía y presión negativa que atrae las placas entre sí. Mientras más estrecho el intervalo, más negativas se vuelven la energía y la presión, y mayor es la fuerza atractiva. El efecto Casimir ha sido medido recientemente por Steve K. Lamoreaux, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, y por Umar Mohideen, de la Universidad de California en Riverside, con su colaborador Anushree Roy. Asimismo, en los años setenta, Paul C. W. Davies y Stephen A. Fulling, adscrito entonces al King's College de la Universidad de Londres, predijeron que una frontera en movimiento, por ejemplo un espejo, debería producir un flujo de energía negativa.

Lo mismo en el caso del efecto Casimir que en el de los estados comprimidos, se ha logrado medir sólo los efectos indirectos de la energía negativa. Aunque resulta harto más difícil la detección directa, pudiera conseguirse utilizando el espín atómico. Lo sugirieron en 1992 Peter

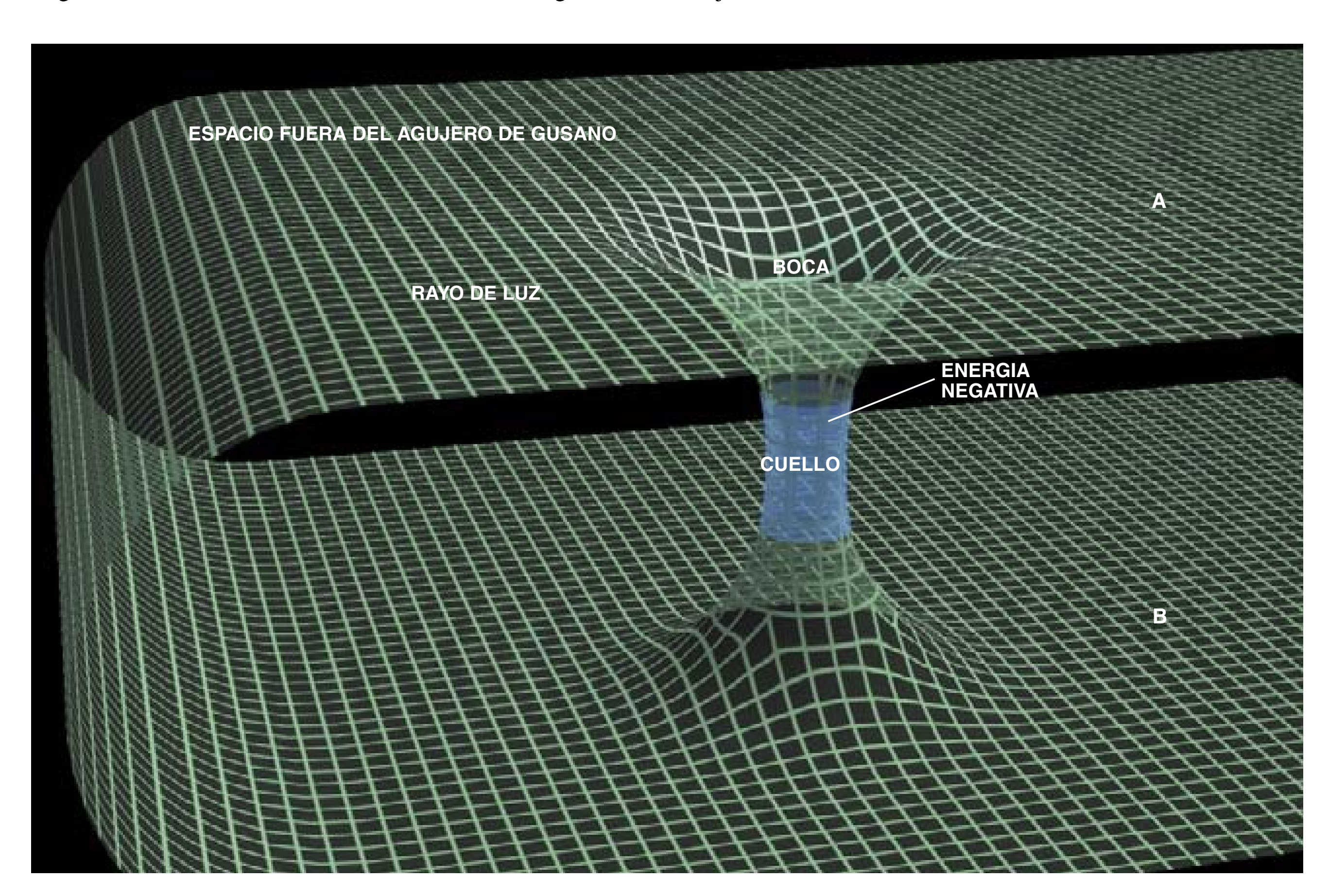
G. Grove, a la sazón en el Ministerio del Interior británico, Adrian C. Ottewill, en la Universidad de Oxford por aquellos días, y uno de nosotros (Ford).

Gravedad y levedad

El concepto de energía negativa aparece en diversas áreas de la física moderna. Guarda íntima vinculación con los agujeros negros, objetos misteriosos cuyo campo gravitatorio es tan intenso, que nada puede escapar una vez dentro de su frontera, u "horizonte de sucesos". En 1974, Stephen Hawking, de la Universidad de Cambridge, enunció una famosa predicción según la cual los agujeros negros se evaporan emitiendo radiación en el proceso [*véase* "La mecánica cuántica de los agujeros negros", por Stephen Hawking; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1977]. Los agujeros negros emiten energía a un ritmo inversamente proporcional al cuadrado de su masa. Aun cuando el ritmo de evaporación sólo es alto para agujeros negros de tamaño subátomico, el hecho mismo de la evaporación refleja una conexión fundamental entre las leyes de los agujeros negros y las leyes de la termodinámica. Merced a la radiación de Hawking, los agujeros negros alcanzan el equilibrio térmico con su entorno.

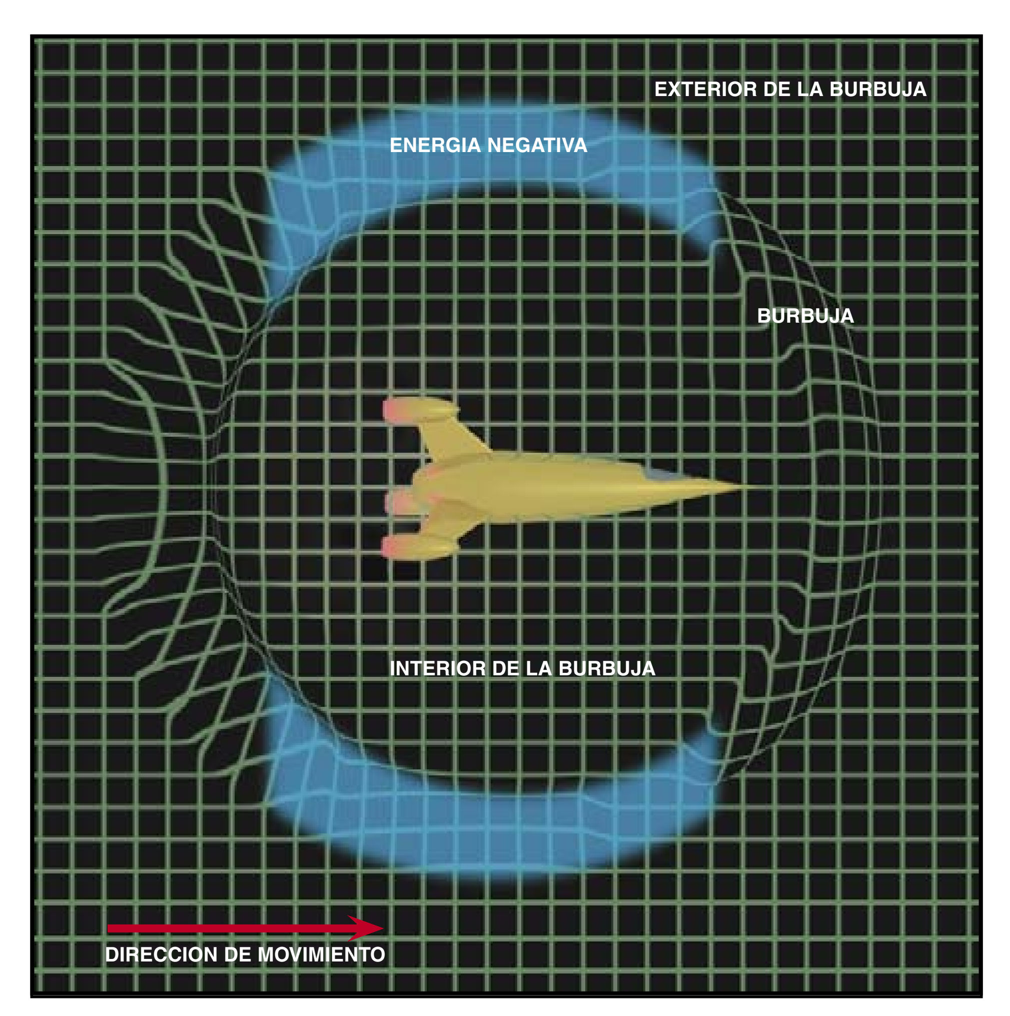
A primera vista, la evaporación de un agujero negro encierra una contradicción. El horizonte de un agujero negro es calle de un solo sentido; la energía sólo puede fluir hacia el interior. ¿Cómo es posible entonces que un agujero negro emita energía hacia el exterior? Porque la energía debe conservarse, la producción de energía positiva —que observadores lejanos ven como la radiación de Hawking— ha de ir acompañada de un flujo de energía negativa hacia el interior del agujero negro. En este caso, la energía negativa está producida por la curvatura extrema del espacio-tiempo cerca del horizonte, que altera las fluctuaciones del vacío. La existencia de la energía negativa resulta necesaria para que la unificación entre la termodinámica y la física de los agujeros negros sea una teoría consistente.

Pero el agujero negro no es la única región de alta curvatura del espacio-tiempo donde la energía negativa desempeña una función importante. Acontece también en los "agujeros de gusano": una especie de túnel hipotético que conecta una región del espacio y del tiempo con otra. Los físicos suponían que los agujeros de gusano podían darse exclusivamente en las escalas espaciales más pequeñas, apareciendo y desapareciendo sin cesar cual partículas virtuales [*véase* "Gravedad cuántica", por Bryce S. DeWitt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1984]. A principios de los años sesenta, Robert Fuller y John A. Wheeler mostraron que los agujeros de gusano se desplomarían ("colapsarían") debido a su propia fuerza de gravedad y lo harían con una rapidez tal, que ni siquiera un rayo de luz tendría tiempo suficiente de viajar a través de los mismos.



3. EL AGUJERO DE GUSANO tiende un túnel entre dos lugares del espacio. Los rayos de luz que viajan de A a B pueden entrar por una de las bocas del agujero de gusano, pasar a través del cuello y salir por el lado opuesto; en el viaje se tardaría mucho más tiempo de seguir el camino largo. En el cuello debe haber energía negativa (*azul*), cuyo campo gravitatorio permite que el haz de rayos lumínicos convergentes comience a divergir. (Este diagrama es una representación bidimensional del espacio tridimensional. Las bocas y el cuello del agujero de gusano son en realidad esferas.) Aunque no se muestra aquí, un agujero de gusano puede poner en contacto dos puntos que difieren en el tiempo.

4. LA BURBUJA espacio-temporal es, desde la física, lo más cercano a la propulsión a distorsión de la fantasía científica. Puede mover a una nave espacial a velocidades arbitrariamente altas. El espacio-tiempo se contrae en el frente de la burbuja, acortando la distancia hasta el punto de destino; se dilata en la parte posterior, aumentando la distancia desde el punto de partida (*flechas*). Con respecto al espacio de su vecindad inmediata, la nave permanece en reposo; su tripulación no experimenta aceleración alguna. Se necesita energía negativa (*azul*) en los lados de la burbuja.



Sin embargo, a finales de los años ochenta varios investigadores —en particular Michael S. Morris y Kip S. Thorne, del Instituto de Tecnología de California (Caltech), y Matt Visser, de la Universidad de Washington— revelaron que eso no era así. Algunos agujeros de gusano podían adquirir tamaño suficiente como para que una persona, o incluso una nave espacial, los atravesara. Podríamos entrar en una de las bocas del agujero de gusano en la Tierra, caminar una distancia pequeña por su interior y salir por el otro lado del agujero en la galaxia de Andrómeda. El problema es que este tipo de agujeros de gusano que permiten semejante recorrido requieren energía negativa. Debido a que la energía negativa produce repulsión gravitatoria, su presencia evita el desplome del agujero de gusano.

Para poder atravesar un agujero de gusano, éste debe (como mínimo) permitir que pasen de un lado a otro las señales en forma de rayos de luz. Las trayectorias de los rayos luminosos que penetran por un lado del agujero de gusano convergen, pero al salir del otro lado ha de divergir de nuevo; en otras palabras, tienen que pasar de convergentes a divergentes en el interior (*véase la figura 3*). Este proceso de desenfoque exige energía negativa. La curvatura del espacio producida por una fuerza de atracción gravitatoria actúa como una lente convergente, en tanto que la energía negativa actúa de lente divergente.

LAWRENCE H. FORD y THOMAS A. ROMAN han colaborado en cuestiones de energía negativa durante más de un decenio. Ford, docente hoy en la Universidad de Tufts, se doctoró en Princeton bajo la supervisión de John A. Wheeler, uno de los fundadores de la física de los agujeros negros. Roman, profesor de física en la Universidad de Connecticut, preparó su tesis de grado en Syracuse bajo la dirección de Peter Bergmann, quien colaboró con Albert Einstein en la teoría del campo unificado.

Metro superlumínico

Este tipo de distorsiones del espacio-tiempo harían realidad otro sueño de la fantasía científica: viajar más rápido que la luz. En 1994 Miguel Alcubierre, entonces en la Universidad de Gales en Cardiff, descubrió una solución a las ecuaciones de Einstein que posee muchas de las características necesarias para hacer posible la propulsión a distorsión. La solución dada por Alcubierre describe una burbuja del espacio-tiempo capaz de transportar una nave espacial a velocidades arbitrariamente altas con respecto a observadores fuera de la burbuja. Los cálculos demuestran que, para eso, también se requiere energía negativa.

Pudiera parecer que la propulsión a distorsión viola la teoría especial de la relatividad de Einstein. Pero la relatividad especial sólo afirma que es imposible viajar más rápido que un rayo de luz que sigue nuestra misma trayectoria. Cuando el espacio-tiempo es curvo, cabe la posibilidad de viajar más rápido que un rayo de luz si tomamos una trayectoria diferente, un atajo. La contracción del espacio en el frente de la burbuja de distorsión y la expansión en la parte posterior producen precisamente dicho atajo (*véase la figura 4*).



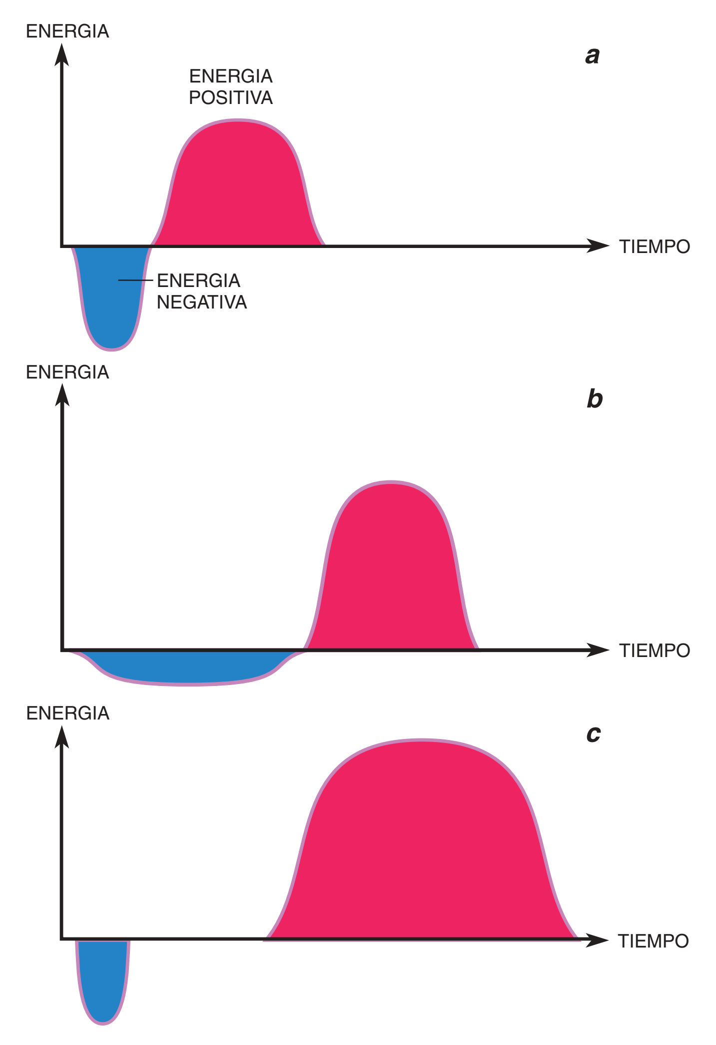


5. VISTA DESDE EL PUENTE de una nave espacial que viaja más deprisa que la luz hacia la Osa Menor (*arriba*). Al aumentar la velocidad (*derecha*), las estrellas frente a la nave (*columna izquierda*) aparentan acumularse en la dirección de movimiento y adquieren un color más azul. Detrás de la nave (*columna derecha*), las estrellas se acumulan en una posición directamente opuesta, se vuelven rojizas y terminan por desvanecerse. No cambia la luz proveniente de estrellas sitas por encima o por debajo mismo de la nave.

Sergei V. Krasnikov, del Observatorio Central Astronómico en Pulkovo, en los aledaños de San Petersburgo, puso de manifiesto un problema que atañe al modelo original de Alcubierre. El interior de la burbuja está desconectado causalmente de su orilla delantera, lo que significa que el capitán de la nave espacial no puede manipular la burbuja, ni crearla ni destruirla; la burbuja debe crearla con anterioridad un agente externo. Para resolver el problema, Krasnikov propuso el "metro superlumínico", un tubo de distorsión espacio-temporal (distinto de un agujero de gusano) que conectaría a la Tierra con una estrella lejana. Dentro del tubo, se puede viajar a velocidades mayores que las de la luz, aunque en un solo sentido. En el viaje de ida, a velocidades menores que la de la luz, la tripulación de una nave espacial crearía el tubo. En el viaje de regreso, podrían usar el tubo para volver a velocidades mayores que la luz. Al igual que las burbujas de distorsión, el metro superlumínico precisa energía negativa. Después de estas propuestas, se ha logrado demostrar, gracias al trabajo de Matt Visser, Ken D. Olum, de la Universidad de Tufts, Bruce Bassett, de la Universidad de Oxford, y Stefano Liberati, de la Escuela Internacional de Estudios Avanzados de Trieste, que cualquier mecanismo que permita viajar más rápido que la luz requiere necesariamente del uso de la energía negativa.

Si pudiéramos construir agujeros de gusano o burbujas de distorsión, viajaríamos en el tiempo. El transcurso de éste es relativo, pues depende de la velocidad del observador. Si una persona deja la Tierra en una nave espacial y viaja a velocidades cercanas a la de la luz, encontraría al regresar que ha envejecido menos que quienes permanecieron aquí. Si el viajero lograra viajar más rápido que la luz, ya sea atravesando un agujero de gusano o utilizando una burbuja de distorsión, podría volver antes de haberse ido. En 1988, Morris, Thorne y Ulvi Yurtsever, entonces en Caltech, propusieron un mecanismo para transformar un agujero de gusano en una máquina del tiempo. Su trabajo estimuló la investigación de los últimos diez años. En 1992 Hawking demostró que cualquier mecanismo creador de una máquina del tiempo en una región finita del espacio-tiempo requiere energía negativa.

Por su carácter extraño, no cuesta mucho sospechar que la energía negativa podría violar determinadas leyes de la física. Antes y después de la creación de cantidades iguales de energía positiva y negativa en el vacío, la energía total se mantiene en cero; por tanto, se satisface la ley de la conservación de la energía. Pero existen muchos fenómenos que conservan la energía y, no obstante, jamás ocurren en el mundo real. Ningún vaso roto se torna a recomponer por sí mismo, ni el calor fluye espontáneamente de un cuerpo frío a otro caliente. Ambos fenómenos están vedados por la segunda ley de la termodinámica, que establece que el grado de desorden de un sistema —su entropía— no puede decrecer por sí mismo sin que sea necesario agregar energía. Por ejemplo, un refrigerador, que transfiere el calor de



6. PULSOS DE ENERGIA NEGATIVA permitidos por la teoría cuántica, siempre que se cumplan tres condiciones. Primera, la longitud del pulso es inversa a su intensidad (*a*, *b*). Segunda, a todo pulso de energía negativa le seguirá otro de energía positiva. Tercera, cuanto más largo sea el intervalo entre ambos pulsos, mayor debe ser el pulso positivo. A este efecto se le denomina "interés cuántico" (*c*).

su interior frío a un exterior más caliente, necesita de una fuente de potencia. De forma similar, la segunda ley de la termodinámica prohíbe también la conversión total del calor en trabajo.

Una energía negativa no domeñada puede entrar en conflicto con la segunda ley. Imaginemos un láser exótico, que crea un rayo continuo de energía negativa. En virtud de la conservación de la energía, debe generarse un flujo continuo de energía positiva. Podríamos encauzar el rayo de energía negativa hacia una región lejana del universo, y utilizar la energía positiva generada para realizar trabajo útil. Esta fuente de energía aparentemente inagotable podría aprovecharse para crear una máquina de movimiento perpetuo que violaría la segunda ley. Si el rayo se dirigiera hacia un vaso con agua, podría enfriar el líquido mientras la energía positiva extraída movería un pequeño motor, creando así un refrigerador que no precisaría de una fuente externa de alimentación. Estos problemas no derivan de la existencia de la energía negativa en sí misma, sino de su separación irrestricta de la energía positiva.

La energía negativa no controlada comportaría también consecuencias profundas para un agujero negro. Cuando en el colapso final de una estrella se forma un agujero negro, la relatividad general predice la creación de una singularidad, una región donde el campo gravitatorio adquiere una intensidad infinita. En este punto, la relatividad general —así como todas las leyes conocidas de la física— es incapaz de describir qué ocurre después. Nos hallamos así ante un clamoroso fiasco de la descripción matemática de la naturaleza que poseemos en la actualidad. Mientras la singularidad se encuentre escondida en el interior del horizonte de sucesos del agujero negro, sin embargo, el daño es limitado. La descripción de la naturaleza fuera del horizonte no se ve afectada. Por esa razón, Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, ha propuesto la hipótesis de la censura cósmica: no puede haber singularidades desnudas, desprotegidas de un horizonte de sucesos.

Para algunos tipos especiales de agujeros negros en rotación o con carga eléctrica —llamados agujeros negros extremos— un pequeño aumento en la carga o el momento angular (espín), o una pequeña disminución en la masa, pueden en principio destruir el horizonte y transformar al agujero negro en una singularidad desnuda. Los intentos de aumentar la carga o el espín de estos agujeros negros, mediante materia ordinaria, siempre parecen fallar; por múltiples razones. Para obviarlo, podríamos pensar en disminuir la masa apuntando un rayo de energía negativa hacia el agujero, sin cambiar su carga eléctrica o su espín, violando así la censura cósmica. Podría crearse un rayo de ese tipo, por ejemplo, utilizando un espejo en movimiento. En principio, bastaría una cantidad muy pequeña de energía negativa para producir un cambio drástico en el estado de un agujero negro extremo. Por consiguiente, éste sería el escenario donde con mayor probabilidad la energía negativa produciría efectos macroscópicos.

Ni separadas, ni iguales

Para nuestra fortuna (o nuestra desgracia, según se mire), aun cuando la teoría cuántica permite la existencia de la energía negativa, manifiesta también imponer fuertes restricciones —llamadas desigualdades cuánticas— en su magnitud y duración. Estas desigualdades fueron sugeridas por Ford en 1978. A lo largo del postrer decenio, han sido demostradas y refinadas por los autores y por Éanna E. Flanagan, de la Universidad de Cornell, Michael J. Pfenning, entonces en Tufts, Christopher J. Fewster y Simon P. Eveson, de la Universidad de York, y Edward Teo, de la Universidad Nacional de Singapur, entre otros.

Las desigualdades cuánticas ofrecen cierta similitud con el principio de incertidumbre. Establecen que un rayo de energía negativa no puede ser arbitrariamente intenso por un tiempo arbitrariamente largo. La magnitud permitida de un pulso de energía negativa es inversamente proporcional a su extensión espacial o su duración temporal. Un pulso intenso de energía negativa puede durar sólo un tiempo corto; un pulso débil puede durar más. Añádase que, a un pulso inicial de energía negativa, debe seguirle un pulso mayor de energía positiva (*véase la figura 6*). Cuanto mayor sea la magnitud del pulso de energía negativa, tanto más cercano será el pulso de energía positiva que lo compense. Se trata de restricciones independientes del mecanismo de producción de la energía negativa. Podemos asimilar la energía negativa a

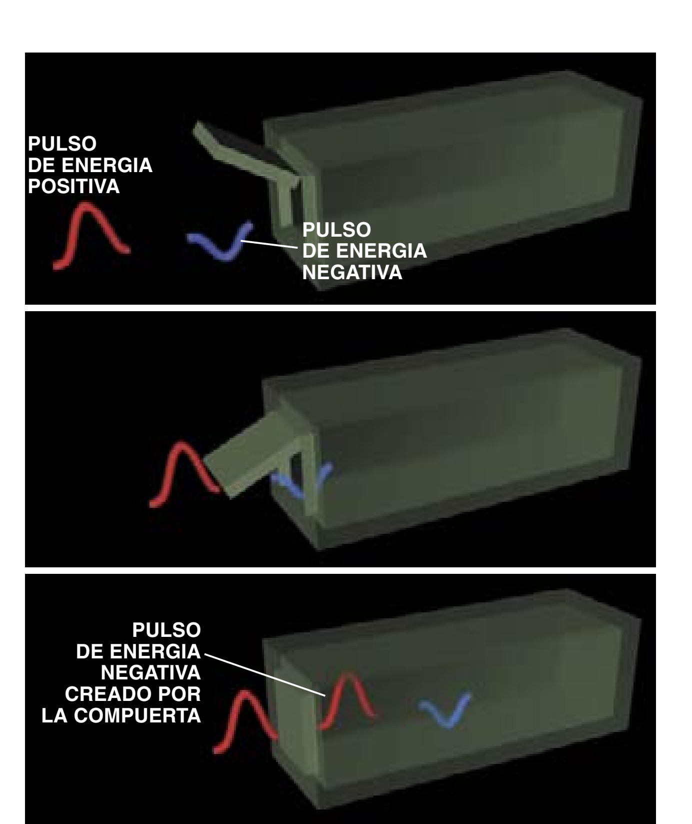
un préstamo de energía. Igual que una deuda es dinero negativo a pagar, la energía negativa es una deuda de energía. Pero la comparación puede llevarse más lejos. Lo veremos pronto.

Aunque en el efecto Casimir la densidad de energía negativa entre las placas puede existir indefinidamente, las densidades grandes de energía negativa requieren separaciones muy pequeñas entre placas. La magnitud de la densidad de energía negativa es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la separación entre placas. Así como un pulso con mucha energía negativa está limitado en el tiempo, en el efecto Casimir una densidad de energía negativa muy alta debe estar contenida entre placas muy próximas. En virtud de las desigualdades cuánticas, la densidad negativa entre placas puede hacerse aún menor que el valor del efecto Casimir, pero sólo transitoriamente. Cuanto más intente uno reducir la densidad de energía por debajo del valor de Casimir, menor es el tiempo durante el cual puede mantenerse dicha situación.

En el caso de los agujeros de gusano y la propulsión a distorsión, las desigualdades cuánticas implican que dichas estructuras deben estar limitadas a tamaños microscópicos; o de ser macroscópicas, la energía negativa ha de hallarse confinada a regiones angostas. En 1996 nosotros mostramos que un agujero de gusano microscópico tendría un cuello con un radio no mayor de unos 10^{-32} metros, apenas por encima de la longitud de Planck, 10^{-35} metros, la distancia más pequeña que encierra sentido físico. Encontramos que es posible construir modelos de agujeros de gusano macroscópicos, a costa, sin embargo, de confinar la energía negativa en una banda angostísima alrededor del cuello. Por ejemplo, en el caso de un agujero de gusano con un cuello con un radio de un metro, la energía negativa debe estar en una banda no mayor de 10^{-21} metros, una millonésima parte del tamaño de un protón. Visser ha estimado que la cantidad de energía negativa requerida para un agujero de gusano con estas propiedades equivale a la energía total generada por 10.000 millones de estrellas en un año. Situación ésta que no mejora mucho si hablamos de agujeros de gusano de mayor tamaño. Para el mismo modelo, el grosor máximo de la banda de energía negativa es proporcional a la raíz cúbica del radio del cuello. Aun cuando aumentemos el radio del cuello hasta el tamaño de un año luz, la energía negativa deberá permanecer contenida en una región menor que el radio de un protón; la energía total requerida aumentará de manera proporcional al tamaño del cuello.

Todo indica, pues, que los ingenieros de agujeros de gusano se enfrentan a problemas formidables. Deben encontrar un mecanismo para confinar grandes cantidades de energía negativa en volúmenes restringidísimos. Las cuerdas cósmicas, esgrimidas en algunas teorías cosmológicas, involucran cantidades ingentes de energía en líneas muy largas y delgadas. Pero todo los modelos físicos razonables de cuerdas cósmicas poseen densidades de energía positivas.

La propulsión a distorsión queda sometida a condiciones más severas. Lo demostraron Pfenning y Allen Everett, de Tufts, mientras trabajaban con los autores. En el modelo de Alcubierre, una burbuja de distorsión que viaja a 10 veces la velocidad de la luz ha de tener paredes cuyo espesor no supere los 10^{-32} metros. Una burbuja capaz de envolver a una nave espacial de 200 metros de largo requeriría una cantidad total de energía negativa igual a 10.000 millones de veces la masa total del universo observable. Al metro superlumínico de Krasnikov también se le aplican restricciones similares. Chris Van Den Broeck, de la Universidad Católica de Lovaina, acaba de proponer una modificación del modelo original de Alcubierre. Su concepción requiere cantidades mucho menores de energía negativa, pero coloca a la nave espacial dentro de una botella de curvatura del espacio-tiempo cuyo cuello mide sólo 10^{-32} metros, algo no fácil de lograr. De estos resultados se desprende cuán difícil será que algún día puedan construirse agujeros de gusano o producir propulsión a distorsión utilizando energía negativa procedente de efectos cuánticos.



7. CUALQUIER INTENTO de evadir las leyes cuánticas que gobiernan la energía negativa termina en fracaso. El físico experimental se propone separar un pulso de energía negativa del pulso de energía positiva que lo compensa. Cuando los pulsos se acercan a la caja (*a*), el físico trata de aislar el pulso negativo cerrando la compuerta, tras haber éste penetrado (*b*). Sin embargo, el acto mismo de cerrar la compuerta crea un segundo pulso de energía positiva dentro de la caja (*c*).

Parpadeo cósmico e interés cuántico

Las desigualdades cuánticas evitan violaciones de la segunda ley de la termodinámica. Si recurrimos a un pulso de energía negativa para enfriar un objeto, le seguirá de inmediato un pulso mayor de energía positiva, que recalentará al objeto. Un pulso débil de energía negativa podría permanecer, más tiempo, separado del pulso positivo que lo compensa, pero sus efectos serían indistinguibles de los asociados a las fluctuaciones térmicas normales. Destinados al fracaso parecen, asimismo, los esfuerzos por capturar o separar al pulso negativo del positivo. Podríamos interceptar un rayo de energía, por ejemplo, utilizando una caja con una compuerta. Se esperaría que, al cerrar la compuerta, quedara atrapado

el pulso de energía negativa antes de que arribara el pulso de energía positiva. Sin embargo, el mismo acto de cerrar la compuerta genera un nuevo pulso de energía positiva que cancela la energía negativa que se había intentado atrapar (*véase la figura 7*).

Hemos demostrado la existencia de restricciones similares en posibles violaciones de la censura cósmica. Un pulso de energía negativa inyectado en un agujero negro cargado podría momentáneamente destruir al horizonte y revelar la singularidad interior. Pero, tras ese pulso, vendría un pulso de energía positiva, que transformaría de nuevo a la singularidad desnuda en un agujero negro. La forma mejor de observar esa suerte de parpadeo cósmico sería dilatar el intervalo entre pulsos de energía negativa y positiva, permitiendo que la singularidad desnuda durara el mayor tiempo posible. Mas para lograr esto, de acuerdo con las desigualdades cuánticas, la magnitud del pulso de energía negativa tendría que ser muy pequeña. El cambio en la masa del agujero negro causado por un pulso tan pequeño de energía negativa sería indistinguible de las fluctuaciones cuánticas normales de la masa del agujero negro, que son consecuencia natural del principio de incertidumbre. La imagen de la singularidad desnuda sería entonces borrosa; un observador remoto no podría afirmar con plena seguridad la violación de la censura cósmica.

Con Frans Pretorius, Fewster y Teo, hemos demostrado que las desigualdades cuánticas llevan a restricciones aún más rigurosas para la energía negativa. El pulso positivo que sigue necesariamente al pulso inicial negativo no se limita a compensar al pulso negativo; antes bien, tiene que sobrecompensarlo. La magnitud de esta sobrecompensación aumenta con el intervalo de tiempo entre ambos pulsos. Por ese motivo, nunca se produce la cancelación exacta entre los pulsos negativos y los positivos. El pulso positivo debe predominar siempre; efecto éste que se conoce por interés cuántico. Si identificamos la energía negativa con un préstamo, éste ha de satisfacerse con intereses. Cuanto mayor sea el período del préstamo, o mayor la cantidad, mayor será el interés. Y cuanto mayor sea el préstamo, menor será el período máximo permitido para su satisfacción. La naturaleza es un banquero astuto que siempre cobra las deudas.

El concepto de energía negativa afecta a la gravitación, la teoría cuántica y la termodinámica. La interrelación de tantas áreas de la física demuestra la compacta estructura lógica de las leyes de la naturaleza. Por un lado, se requiere la energía negativa para reconciliar la física de los agujeros negros con la termodinámica. Por otro, la física cuántica no permite la producción de cantidades arbitrarias de energía negativa, lo que violaría a su vez la segunda ley de la termodinámica. Si estas restricciones forman parte de una teoría más fundamental, léase la gravedad cuántica, está por verse. Sin duda alguna, la naturaleza nos guarda todavía numerosas sorpresas más.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BLACK HOLES AND TIME WARPS: EINSTEIN'S OUTRAGEOUS LEGACY. Kip S. Thorne. W. W. Norton, 1994.

LORENTZIAN WORMHOLES: FROM EINSTEIN TO HAWKING. Matt Visser. American Institute of Physics Press, 1996.

QUANTUM FIELD THEORY CONSTRAINS TRAVERSABLE WORMHOLE GEOMETRIES. L. H. Ford y T. A. Roman en *Physical Review* D, vol. 53, n.º 10, páginas 5496-5507; 15 de mayo, 1996. Accesible en xxx.lanl.gov/abs/gr-qc/9510071 en la World Wide Web.

THE UNPHYSICAL NATURE OF WARP DRIVE. M. J. Pfenning y L. H. Ford en *Classical and Quantum Gravity*, vol. 14, n.º 7, páginas 1743-1751; julio de 1997. Accesible en xxx.lanl.gov/abs/gr-qc/9702026 en la World Wide Web.

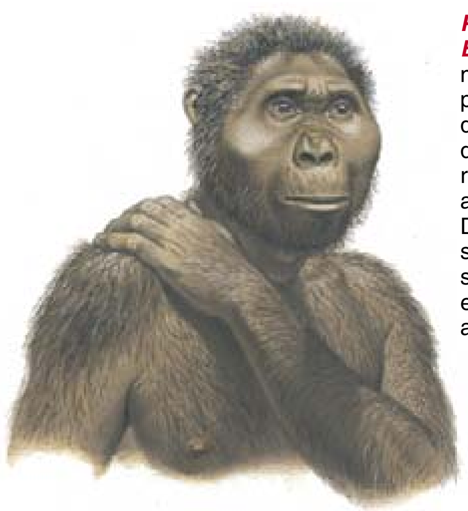
PARADOX LOST. Paul Davies en *New Scientist*, vol. 157, n.º 2126, página 26; 21 de marzo, 1998.

TIME MACHINES: TIME TRAVEL IN PHYSICS, METAPHYSICS, AND SCIENCE FICTION. Segunda edición. Paul J. Nahin. AIP Press, Springer-Verlag, 1999.

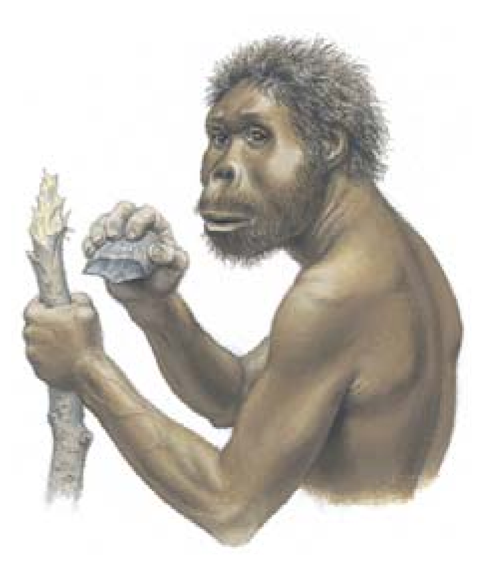
THE QUANTUM INTEREST CONJECTURE. L. H. Ford y T. A. Roman en *Physical Review* D, volumen 60, n.º 10, artículo número 104018 (8 páginas); 15 de noviembre, 1999. Accesible en xxx.lanl.gov/abs/gr-qc/9901074 en la World Wide Web.

Damos por supuesto que Homo sapiens *es el único homínido sobre la Tierra. Pero eso es hoy.*

Homínidos contemporáneos



PARANTHROPUS BOISEI poseía unas mandíbulas enormes provistas de grandes dientes para una dieta de tipo vegetariano. Su cráneo era, asimismo, robusto. Desconocemos si su tamaño corporal superaba en mucho el de los "gráciles" australopitecos.



HOMO RUDOLFENSIS, representado por el famoso cráneo KNM-ER 1470, alcanzó una capacidad cerebral bastante notable. Su cráneo era distinto del que tenía *Homo habilis*, de una capacidad cerebral menor, según parece. Desconocemos sus proporciones corporales.

Durante cuatro millones de años, compartieron el planeta diferentes especies de homínidos

Ian Tattersall
Dibujos de Jay H. Matternes

1. COMPARTIENDO UN MISMO PAISAJE, cuatro tipos de homínidos vivieron hace alrededor de 1,8 millones de años en lo que hoy es el norte de Kenia. Aunque los paleoantropólogos no conocen cómo se relacionaban estas especies, en el caso de que lo hicieran, sí pueden afirmar que *Paranthropus boisei*, *Homo rudolfensis*, *H. habilis y H. ergaster* habitaron en los alrededores del lago Turkana.



HOMO HABILIS, así llamado porque se le suponía creador de los instrumentos líticos, de 1,8 millones de años de antigüedad, hallados en la garganta de Olduvai, en Tanzania. Este homínido obtenía lascas con filos golpeando una roca contra otra.



HOMO ERGASTER, en ocasiones llamado "*H. erectus* africano", tenía un cráneo alto y redondeado y un esqueleto, a grandes rasgos, muy similar al de la humanidad actual. Aunque *H. ergaster* consumía carne, su dentición masticadora era bastante pequeña. El mejor ejemplar de este homínido es un esqueleto de adolescente de hace 1,6 millones de años, el "chico del Turkana".

Homo sapiens ha dominado la Tierra a lo largo de los últimos 25.000 años, sin nadie de su misma familia homínida que se la disputara. Tantos años han hecho mella y existe muy arraigada la sensación de que nuestra soledad es lo natural y apropiado.

Tal ha sido la aquiescencia, que en los años cincuenta y sesenta emergió una corriente que defendía que sólo una especie de homínido podía haber vivido en cualquier momento dado, pues no había en el planeta nicho ecológico para más de una especie creadora de cultura. La "hipótesis de la especie única" nunca resultó muy convincente, ni siquiera con el magro registro fósil disponible hace 35 años. Pero la idea subyacente de una lenta e inexorable transformación, desde el encorvado e ignorante homínido ancestral hasta el estilizado e inteligente *H. sapiens* de nuestros días, era harto sugestiva.

El modelo prendió con energía. Hasta finales de los años setenta no se rechazó la hipótesis de la especie única. En el norte de Kenia aparecieron pruebas fósiles que demostraban la coexistencia de diferentes especies de homínidos, hace 1,8 millones años. Pese a esos indicios, los paleoantropólogos se resistieron a dar su brazo a torcer y seguían manteniendo una interpretación minimalista del registro fósil. Se tendía a reducir el número de especies y agrupar fósiles con diferencias notables bajo un mismo nombre impreciso; por ejemplo, "*Homo sapiens* arcaico". Y así desaparecía de la vista la perspectiva de la coexistencia de diversos tipos de homínidos.

Aunque la tendencia minimalista persiste, nuevos hallazgos y el reexamen de fósiles ya estudiados muestran que los homínidos han conocido una historia biológica similar a la de la mayoría de las familias de animales. Se caracteriza por su diversidad, no por una progresión lineal. Pese a esa historia tan feraz, en cuyo curso aparecieron y convivieron, compitieron, crecieron y desaparecieron diferentes especies de homínidos, sólo *H. sapiens* ha sobrevivido. Las causas de ese éxito son, en buena medida, imposibles de conocer, pero la naturaleza de las relaciones entabladas entre *H. sapiens* y *H. neanderthalensis*, los dos últimos homínidos que coexistieron, y lo hicieron en dos regiones geográficas distintas, nos ofrece interesantes perspectivas.



Un haz de especies

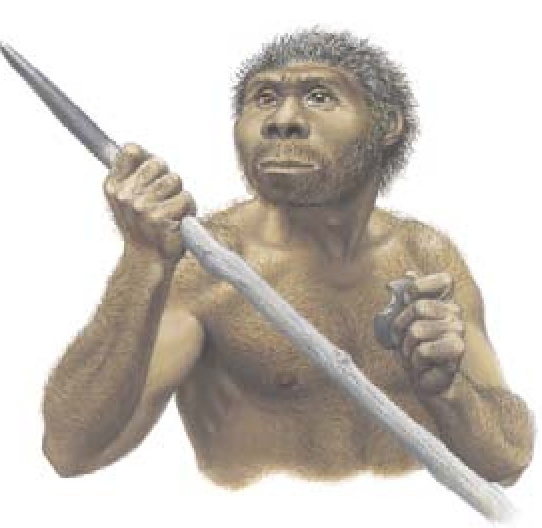
Desde nuestros orígenes, desde el momento en que el australopiteco u homínido bípedo más antiguo dio sus primeros pasos vacilantes fuera de la espesura de los bosques, podemos percibir la diversidad de los homínidos. El homínido más remoto que conocemos quizá sea *Ardipithecus ramidus*, representado por algunos fragmentos fósiles con 4,4 millones de años de antigüedad que proceden del yacimiento etíope de Aramis. Un poco más reciente, con 4,2 millones de años de antigüedad y mejor conocido, es *Australopithecus anamensis*, descubierto en varios yacimientos del norte de Kenia.

Por pruebas indirectas se reconoce bipedismo en *Ardipithecus*, lo que no obsta que se tratara de una especie con numerosos rasgos de primates antropoideos. Otra cosa fue *A. anamesis*, muy semejante a *Australopithecus afarensis*, que vivió hace entre 3,8 y 3 millones de años. A esta especie bípeda, con un cerebro pequeño y una cara grande, pertenece la famosa "Lucy". En varios yacimientos de Africa oriental se han cosechado abundantes restos de *A. afarensis*. Algunos investigadores opinan, sin embargo, que entre los fósiles atribuidos a *A. afarensis* podría haber más de una especie, una cuestión abierta con la que tendremos que enfrentarnos algún día. En cualquier caso, *A. afarensis* no estaba solo en Africa; se acaba de descubrir en el Chad una mandíbula peculiar de *Australopithecus bahrelghazali*, de una fecha probable hace entre 3,5 y 3,0 millones de años; fue, pues, contemporánea de Lucy.

Se ha anunciado, asimismo, el hallazgo de otra especie homínida bípeda en Africa del Sur. Se le atribuye una antigüedad de 3,3 millones de años, si bien hay que estudiarla más a fondo y darle nombre específico. De esta misma región geográfica, con 3 millones años de antigüedad, proceden fósiles de *A. africanus*, el primer australopiteco descubierto (en 1924); pudo haber sobrevivido hasta hace poco más de 2 millones de años. Otra especie nueva, con 2,5 millones de años de antigüedad y procedente de Etiopía, es *Australopithecus garhi*; se la ha colocado en una posición evolutiva intermedia: por un lado, *A. afarensis*, y por el otro, un amplio grupo que abarca a los australopitecos más recientes y a *Homo*. De parecida fecha es el primer representante de



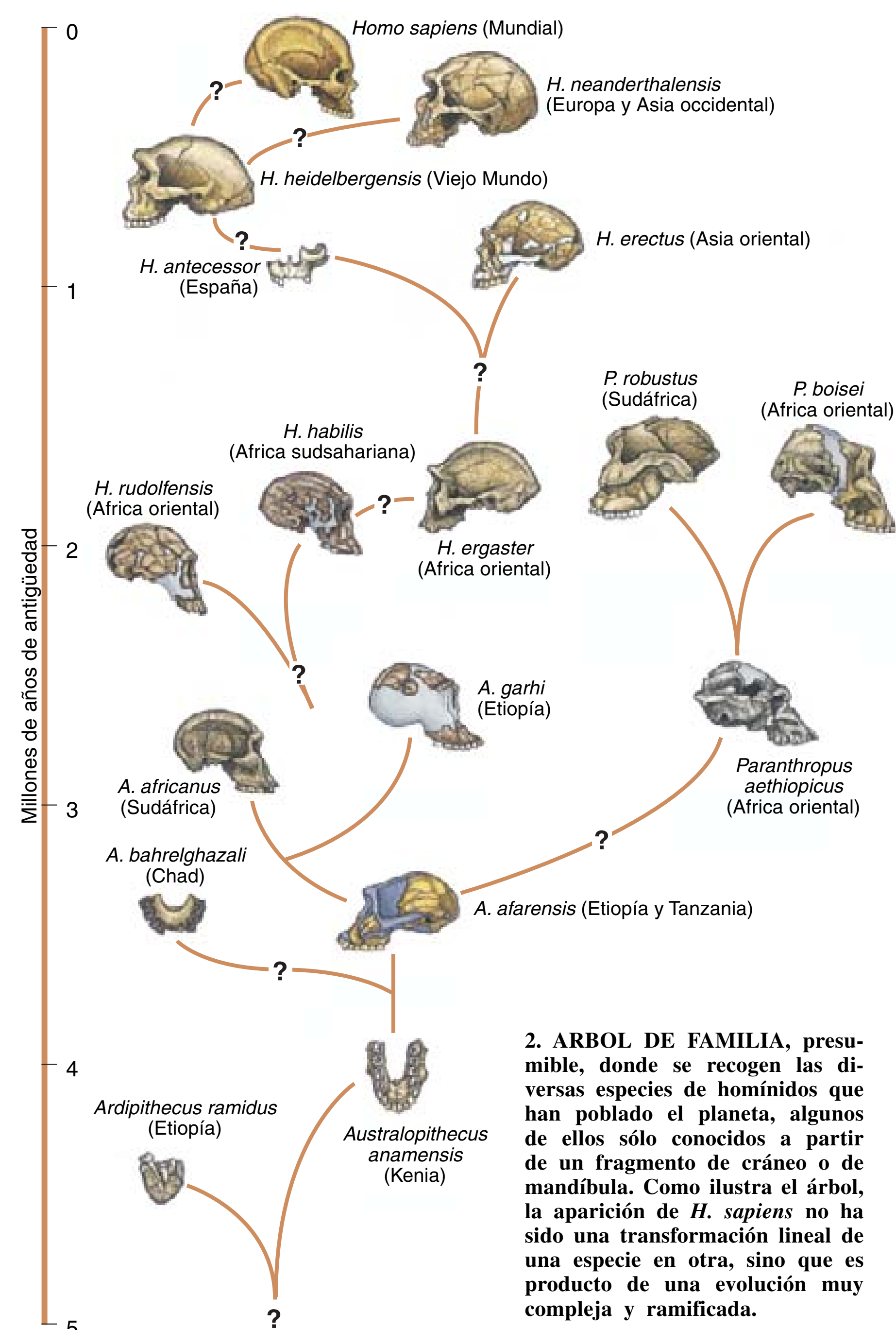
LA CUEVA DE TUC D’AUDOUBERT, en Francia, fue visitada hace entre 13.000 y 11.000 años por los *H. sapiens*, también llamados cromañones, que esculpieron pequeños bisontes de arcilla en una estancia distante más de un kilómetro desde la entrada. Ciertos homínidos con una forma corporal moderna aparecieron en Africa hace unos 150.000 años y coincidieron durante algún tiempo con otros homínidos, antes de convertirse en la única especie viva de nuestra familia. Hasta hace unos 30.000 años, fueron contemporáneos de *H. neanderthalensis* (*izquierda*) en Europa y en el Próximo Oriente, y quizá también de *H. erectus* (*derecha*), que entonces vivía en Java.



australopiteco “robusto”, *Paranthropus aethiopicus*. Conocemos a esta forma primitiva gracias al “cráneo negro”, de 2,5 millones de años, desenterrado en el norte de Kenia. En el intervalo que media entre hace 2 y 1,4 millones de años, los australopitecos robustos están representados en Africa oriental por el famoso *P. boisei*. En Sudáfrica, 1,6 millones de años atrás, los robustos incluían a *P. robustus* y posiblemente a una segunda especie emparentada, *P. crassidens*.

Pido disculpas por haberles castigado con esta larga lista de nombres. La verdad es que, incluso con ese elenco, queda infraestimado el número de especies de australopitecos que existieron. Ignoramos cuánto perduró cada grupo homínido de ésos. Y, aunque la longevidad media de cada especie fuera de pocos cientos de miles de años, resulta palmario que, desde nuestros orígenes, el continente africano estuvo poblado, de forma periódica si no continua, por múltiples tipos de homínidos.

Con la aparición del género *Homo* no cambió la situación. El registro fósil de especímenes de 2,5 a 1,8 millones de años, procedentes del este y sur de Africa, dan testimonio de la presencia de *Homo* y forman un conjunto abigarrado; quizá divergen entre sí más de lo que revela la división habitual en un par de especies, *H. habilis* y *H. rudolfensis*. Al este del lago Turkana en Kenia, hace 1,9 o 1,8 millones de años, coincidieron ambas especies con el ubicuo *P. boisei* y con *H. ergaster*, el primer homínido de hechuras corporales modernas. He aquí, pues, una prueba inequívoca de cuatro especies que comparten continente y paisaje.



2. ARBOL DE FAMILIA, presumible, donde se recogen las diversas especies de homínidos que han poblado el planeta, algunos de ellos sólo conocidos a partir de un fragmento de cráneo o de mandíbula. Como ilustra el árbol, la aparición de *H. sapiens* no ha sido una transformación lineal de una especie en otra, sino que es producto de una evolución muy compleja y ramificada.

El primer éxodo de los homínidos de Africa, protagonizado por *H. ergaster* o por otra especie emparentada, abrió un mundo de posibilidades para la diversificación ulterior. Nos gustaría disponer de un registro arqueológico más sólido de esa emigración africana. Con todo, tenemos indicaciones claras de la llegada de los homínidos a China y Java, hace unos 1,8 millones de años. De esa época podría ser cierta mandíbula de Dmanisi, en la república de Georgia; la pieza en nada se parece a las recuperadas en otros yacimientos. Hace un millón de años, *H. erectus* se hallaba firmemente asentado en Java y China; quizás, había también en Java una segunda especie de homínido más robusta. En el otro extremo del continente eurasiático, los fósiles de los primeros europeos conocidos —con 800.000 años de antigüedad— son muy distintos; se trata, a juicio de sus descubridores españoles, del *H. antecessor*.

Hace 600.000 años, en Africa, medraba *H. heidelbergensis*, que vivió también en Europa y, tal vez en China, entre hace 500.000 y 200.000 años. Cuanto más ahondamos en el conocimiento de *H. heidelbergensis*, más nos convencemos de que no podemos confinar los fósiles en una sola especie. De *H. heidelbergensis,* o de otra especie emparentada, se originó en Europa *H. neanderthalensis*, grupo que pobló Europa y Asia occidental entre hace 200.000 y 30.000 años. Es magro el registro fósil africano de esa época, indicio verosímil de que se asistía a una evolución independiente, que daría lugar a la aparición de *H. sapiens*. La antigüedad de los fósiles de *H. erectus* de Ngandong, en Java, se cifra en unos 40.000 años, lo que significa que había que admitir una historia evolutiva propia para los homínidos de esta región, quizá, durante millones de años.

Con semejante cuadro esquemático de la evolución humana nos alejamos muchísimo del guión que imperaba hace 40 años: “*Australopithecus africanus* engendró a *Homo erectus*, que engendró a *Homo sapiens*”. Cambio

de escenario que resulta del estudio del rico muestrario descubierto. No obstante, sigue vivo, aunque agazapado, el pensamiento evolutivo lineal en paleoantropología, reticente ante lo que considera excesivo énfasis en la diversidad. Y para simplificar el cuadro, cobijan bajo el paraguas de *H. sapiens* a todas las variedades de *Homo* del último medio millón de años, si no de los postreros dos millones.

Mi opinión por contra se sitúa en los antípodas. La veintena de especies de homínidos que he mencionado representan una estimación a la baja. El registro fósil de los homínidos abunda en indicadores de diversidad, que no han sido admitidos. Sería aventurado, además, sostener que todas las especies de homínido que han existido se hallan representadas en las colecciones de fósiles. Aun cuando fuera cierto, seguiría siendo evidente que la historia de la evolución humana distó de ser la pugna ascendente de un héroe solitario.

Antes bien, la naturaleza tomó de aquí y de allá, en ensayos evolutivos sin cuento. Nuestra historia evolutiva ha sido el resultado de eventos esporádicos, no de acumulaciones graduales. A lo largo de los últimos cinco millones de años, numerosas especies de homínidos surgieron, compitieron, coexistieron, colonizaron nuevos nichos y pervivieron o se extinguieron. Sólo podemos atisbar débilmente el decurso de esa historia de innovaciones y relaciones; pero está claro que nuestra especie, lejos de coronar el árbol evolutivo, es una más entre sus múltiples ramas.

Las raíces de nuestra soledad

Sin desdecirnos de lo anterior, resulta asimismo cierto que *H. sapiens* constituye el protagonista de algo insólito. No habiendo ahora otro, se ha dejado aprehender sin resistencia. Cualquier cosa que ello signifique, guardará relación con la forma en que nos relacionemos con el mundo externo: desarrolla una conducta, lo que indica que debemos analizar el registro arqueológico para descubrir pruebas de la misma. El registro arranca de hace 2,5 millones de años, con la fabricación de los primeros instrumentos líticos reconocibles: lascas simples afiladas, obtenidas a partir de núcleos de piedra. No sabemos quién fue su inventor, aunque cabe atribuirlo a alguien parecido a un australopiteco.

Esta innovación supuso un gran salto cognitivo con profundas consecuencias a largo plazo. Se inició así una larga e intermitente evolución técnica en los homínidos. Transcurrió un millón de años antes de que se operase el siguiente avance técnico: la invención del bifaz, hace 1,5 millones de años, posiblemente por *H. ergaster*. Estos instrumentos, simétricos y extraídos de grandes núcleos, fueron los primeros en mostrar la existencia de un "molde ideal" en la mente de su creador. Molde que no sufrió cambios fundamentales en el curso de otro millón de años, o algo más, hasta la invención de la "preparación del núcleo" por *H. heidelbergensis* o por alguien semejante. En esta talla, el núcleo de piedra era cuidadosamente elaborado de forma que bastaran luego unos golpes para obtener instrumentos acabados.

Entre los mejores homínidos que practicaban la técnica de la preparación de núcleos se encuentran los neandertales. Presentaban un desarrollo cerebral notable, rostros enormes y cráneos bajos; vivieron en Europa y Asia occidental hasta hace 30.000 años. Gracias al amplio registro arqueológico que generaron, y a su brusca sustitución por los humanos modernos, que hicieron lo mismo, los neandertales nos proporcionan un criterio instructivo para ponderar nuestra singularidad. Las habilidades de los neandertales en la talla de la piedra, aunque sorprendentes, eran algo estereotipadas; muy pocas veces, si alguna, elaboraban instrumentos utilizando otras materias primas. Muchos paleontólogos ponen en cuestión su grado de especialización venatoria.

Las viejas ideas que hablaban de estrambóticos "cultos al oso" y otros rituales entre los neandertales carecen de base. No hay fundamento sólido para atribuirles un comportamiento simbólico o de producción de objetos simbólicos, al menos antes de que entraran en contacto con los humanos modernos. Aunque los neandertales enterraban ocasionalmente a sus muertos, podrían hacerlo para evitar las incursiones de las hienas en sus viviendas o por otra razón trivial; los enterramientos neandertales carecen de objetos rituales que testifiquen la creencia en la vida de ultratumba. En otras palabras, los neandertales, en muchos aspectos admirables y exitosos durante largo tiempo, bajo las difíciles circunstancias de las épocas glaciales, carecían de la chispa de creatividad que, a la postre, distinguiría a *H. sapiens*.

Pese a estar rodeado de bastante confusión cuanto atañe al origen de la morfología de *H. sapiens*, todo indica que se produjo en Africa. Quizás entre 150.000 y 200.000 años atrás. El comportamiento moderno apareció mucho más tarde. La mejor información procede de Israel y su vecindad, donde los neandertales vivieron desde hace 200.000 años e incluso antes. Hace 100.000 años se encontraron con los *H. sapiens* anatómicamente modernos. Llama la atención la identidad de los útiles de piedra y los yacimientos que nos legaron ambas especies. En lo que podemos percibir, se comportaban de un modo afín, pese a sus diferencias anatómicas. Durante su período de coincidencia, compartieron ecosistemas del Próximo Oriente.

En Europa la situación era muy otra. Allí, los yacimientos más antiguos de *H. sapiens* datan de hace unos 40.000 años. Apenas 10.000 años después, se extinguieron los neandertales. Los *H. sapiens* que invadieron Europa llevaron consigo pruebas abundantes de un tipo de sensibilidad moderna, sin precedentes y completamente desarrollada. No sólo portaban una nueva técnica lítica, el "Paleolítico Superior", basada en la producción de largas y delgadas hojas a partir de núcleos cilíndricos, sino que también elaboraban instrumentos de hueso y cuerna, mostrando un profundo conocimiento de las propiedades de estos materiales.

Más significativo es que con ellos iba el arte, del que dejaron estampa en objetos tallados, grabados y magníficas pinturas rupestres. Inscribían signos de registro en huesos y tablillas de piedra. Fabricaban instrumentos musicales de viento. Elaboraban delicados adornos personales. Enterraban a sus muertos, ofreciéndoles objetos rituales (que, además de la creencia en una vida ultraterrena, nos indica una estratificación social, porque no todas las tumbas presentan el mismo tratamiento). Sus asentamientos, muy organizados, evidencian estrategias de caza y pesca. La innovación técnica, producida antaño de forma intermitente, dejó paso a un proceso de refinamiento constante. Sin la menor duda, aquellas gentes éramos *nosotros*.

En todas esas características las poblaciones del Paleolítico Superior diferían de los neandertales. Aunque algunos neandertales de Europa aprenderían cosas de los recién llegados *H. sapiens*, no tenemos pruebas directas de las relaciones entre las dos especies. Pero

considerando la rápida desaparición de los neandertales y el amplio registro posterior de *H. sapiens*, podemos suponer que estas relaciones no fueron muy afortunadas para los primeros. Los ejemplos de una sustitución rápida se repiten en los yacimientos arqueológicos. No existe en Europa ninguna prueba biológica firme de hibridación entre ellas.

En el Próximo Oriente, después de 60.000 años, la coexistencia terminó al mismo tiempo que empezaron a aparecer los instrumentos del Paleolítico Superior. Hace 40.000 años los neandertales del Próximo Oriente cedieron el paso a los *H. sapiens*, más desarrollados en su cultura, igual que sus homónimos europeos.

La explicación de las diferencias entre Europa y el Próximo Oriente reside, muy probablemente, en la aparición de la cognición moderna, que podemos suponer de consuno con el desarrollo del pensamiento simbólico. Pese a la adquisición de la morfología esquelética moderna, la situación estaba bastante equilibrada. Sólo más tarde, con el desarrollo de un tipo de comportamiento moderno, *H. sapiens* se convirtió en un competidor intolerante con los seres más cercanos.

Para entender este cambio de sensibilidad, debemos recordar ciertos aspectos del proceso evolutivo. En primer lugar, todas las innovaciones, y este caso no era una excepción, se dan necesariamente en el seno de especies preexistentes ¿Dónde podría producirse si no? En segundo lugar, muchas novedades surgen como “exaptaciones”, es decir, caracteres adquiridos en un contexto antes, a menudo mucho antes, de que pasen a formar parte de otro distinto. Por ejemplo, los homínidos poseían un aparato fonador básicamente moderno desde hace cientos de miles de años; mucho antes de que, a partir del registro cultural, podamos pensar que poseían un lenguaje articulado, y que la peculiar morfología del aparato fonador les permitía. Por último, debemos considerar la posibilidad de la aparición de algo totalmente inesperado gracias a una casual coincidencia. Suele aducirse el ejemplo clásico del agua, cuyas propiedades resultan impredecibles a partir de átomos solitarios de hidrógeno y oxígeno.

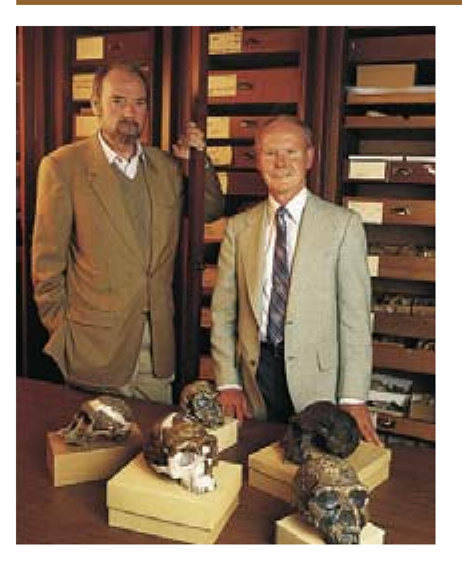
Si combinamos todas esas observaciones podemos ver que, aunque la adquisición de pensamiento simbólico tuvo profundas consecuencias, el proceso de su aparición no fue excepcional. Ignoramos hoy de qué modo el cerebro humano convierte el conjunto de descargas químicas y eléctricas en consciencia. Pero podemos afirmar que nuestro linaje pasó a disfrutar de un pensamiento simbólico desde un estado precedente no simbólico. La única explicación verosímil es que, con la llegada del *H. sapiens* anatómicamente moderno, las exaptaciones previas se combinaron por azar con pequeños cambios genéticos, creando un potencial sin precedentes.

No podemos dar por completo ese relato, pues los humanos anatómicamente modernos siguieron siendo arcaicos durante mucho tiempo antes de adquirir un comportamiento moderno. Tal salto podría ser resultado de la tardía aparición de novedades clave que no dejan huella en el esqueleto, lo único que fosiliza. Pero parece improbable, porque implicaría la sustitución en el Viejo Mundo de todas las poblaciones de homínidos en un breve período de tiempo, algo de lo que no tenemos pruebas.

Se nos antoja más probable que la nueva capacidad de los humanos modernos surgió con el origen de *H. sapiens* o en su vigilia. Esa propiedad no se manifestó hasta que fue activada por algún tipo de estímulo cultural. Si proporcionaba alguna ventaja, semejante innovación de la conducta se transmitió rápidamente por el contacto cultural entre las poblaciones que ya tenían el potencial para adquirirlo. No fue necesaria ninguna sustitución de poblaciones.

No podemos afirmar con seguridad en qué consistió la innovación de marras. Sin embargo, no hay mejor alternativa que la adquisición del lenguaje, medio por el que expresamos nuestras ideas y experiencias a otros y elemento fundamental para el pensamiento. Implica crear categorías y dar un nombre a los objetos y sensaciones del mundo externo e interno, así como realizar asociaciones con los símbolos mentales. No podemos concebir el pensamiento (tal y como lo conocemos) sin un lenguaje; la capacidad de elaborar símbolos mentales es la fuente de nuestra creatividad, porque sólo después de forjar tales símbolos podemos combinarlos y formularnos preguntas como “¿Qué pasaría si...?”.

Aunque los lingüistas le han dedicado muchas horas de especulación, se nos escapa cómo surgió el lenguaje. Pero sabemos que un ser equipado por capacidades simbólicas es un rival extraordinario, y no necesariamente un ser del todo racional, tal y como el resto de seres vivos, *H. neanderthalensis* incluido, han podido descubrir a su costa.



LOS AUTORES

IAN TATTERSALL y JAY H. MATTERNES han trabajado juntos desde principios de los años noventa. Tattersall (*sin corbata*) se crió en Africa oriental. Dirige el departamento de antropología del Museo Americano de Historia Natural. Matternes es dibujante y escultor especializado en primates fósiles y homínidos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LANGUAGE AND SPECIES. Derek Bickerton. University of Chicago Press, 1990.

THE FOSSIL TRAIL: HOW WE KNOW WHAT WE THINK WE KNOW ABOUT HUMAN EVOLUTION. Ian Tattersall. Oxford University Press, 1995.

AFRICAN EXODUS: THE ORIGINS OF MODERN HUMANITY. Christopher Stringer y Robin McKie. Henry Holt, 1997.

GETTING HERE: THE STORY OF HUMAN EVOLUTION. Edición actualizada. Williams Howells. Compass Press, 1997.

THE LAST NEANDERTHALS: THE RISE, SUCCESS AND MYSTERIOUS EXTINCTION OF OUR CLOSEST HUMAN RELATIVES. Ian Tattersall. Macmillan, 1995 (segunda edición de Westview Press, en diciembre de 1999).

THE ORIGIN AND DIVERSIFICATION OF LANGUAGE. Dirigido por Nina G. Jablonski y Leslie C. Aiello. University of California Press, 1998.

Islas de estabilidad



La síntesis del elemento 114 corroboró que en el mar de los efímeros núcleos superpesados emerge una isla de estabilidad nuclear

Yuri Ts. Oganessian, Vladimir K. Utyonkov y Kenton J. Moody

Con la creación del elemento neptunio en la primavera de 1940 comenzó el fascinante viaje de los químicos hacia una tierra desconocida. En ese mundo transuránico, donde los núcleos tienen más protones que los 92 del núcleo del uranio, los átomos exhiben propiedades insólitas o exclusivas. Esos elementos pesados, con tantos electrones, nos han proporcionado conocimientos preciosos acerca de la disposición de los electrones en los átomos y en los enlaces químicos. Los elementos tienen, además, aplicaciones técnicas que van de las armas nucleares a los detectores de humos.

Por ahora esta investigación ha producido 23 elementos nuevos, cuyos núcleos atómicos alojan más protones que los átomos de uranio. De esos 23, sólo los dos más "ligeros" —el neptunio y el plutonio— existen en la naturaleza.

La reciente creación del elemento 114 ha supuesto el final de una difícil etapa del viaje transuránico, la travesía del peligroso mar de inestabilidad de los elementos que presentan más de 106 protones en sus núcleos. Bombardeando núcleos pesados con haces de iones de núcleos más ligeros se han creado núcleos superpesados tan inestables, que se parten a menudo sólo una minúscula fracción de segundo después de su formación. Pero, al acercarse al número "mágico" 114, se desembarcó en una isla de estabilidad donde una serie de elementos aún más pesados poseen una estabilidad y una longevidad sorprendentes.

Como pasaba con la mítica ciudad de El Dorado, hacía mucho que se creía en la existencia de la isla de estabilidad, aunque se daba por descontada la imposibilidad de poner pie en ella. Desde 1966 los físicos



1. FISICOS Y QUIMICOS del Instituto Conjunto de Investigaciones Nucleares de Dubna, junto al dispositivo experimental. El separador de masas está en la esquina izquierda superior, y hacia la derecha se ve un brazo del aparato que alberga el blanco. Utyonkov y Oganessian, dos de los autores, son segundo y cuarto por la izquierda.

venían teorizando sobre la misma. A diferencia de El Dorado, el paradero de la isla de estabilidad no era secreto: estaba predicho que su punto central y más estable era un isótopo del elemento 114 de 184 neutrones, rodeado por elementos, vecinos menos estables, entre el 109 y el 115. Se sabía con exactitud a dónde había que ir; lo difícil era cómo llegar y cómo saber que se había llegado.

Los primeros intentos de sintetizar un elemento se remontan a 1934, cuando se empezó a bombardear los núcleos de elementos pesados con chorros de neutrones. Cada neutrón capturado por los núcleos del átomo blanco experimentaba una desintegración beta y se convertía en un protón y un electrón, con lo que se creaba un elemento que tenía un protón más en su núcleo que el núcleo blanco. En el lenguaje de los químicos, el elemento creado tenía un número atómico mayor, en uno, que el elemento blanco. El número atómico de un elemento dice simplemente cuántos protones encierran los núcleos de sus átomos. El número define un elemento y su ubicación en la tabla periódica. Además de protones, los núcleos atómicos contienen neutrones, carentes de carga. Todos los átomos de un solo elemento deben tener el mismo número de protones; ahora bien, diferentes "isótopos" del elemento mostrarán números diferentes de neutrones y diferentes grados de estabilidad.

YURI TS. OGANESSIAN, VLADIMIR K. UTYONKOV y KENTON J. MOODY colaboran desde 1989 en la creación de elementos pesados. Oganessian dirige el laboratorio Flerov de reacciones nucleares del Instituto Conjunto de Investigaciones Nucleares (ICIN) de Dubna, en los aledaños de Moscú. Se licenció en el Instituto de Física e Ingeniería de Moscú en 1956 y desde entonces investiga en los campos de la física y química nucleares. Utyonkov se formó también en el Instituto de Ingeniería Física de Moscú. Especialista en síntesis y propiedades de los núcleos pesados, desde 1997 es vicejefe del grupo investigador del ICIN. Moody recibió su doctorado en química nuclear en la Universidad de California en Berkeley en 1983. Trabaja en la división de química analítica y nuclear del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore.

A mediados de los años cincuenta se produjeron los elementos 93, 94, 99 y 100. En ese mismo período se crearon los elementos 95, 96, 97, 98 y 101 irradiando núcleos pesados con chorros de partículas alfa, que son núcleos de helio; el número atómico saltaba de golpe dos escalones.

Gracias al desarrollo de los aceleradores de partículas se pudieron dirigir haces muy intensos de iones de elementos ligeros, de boro (número atómico 5) por ejemplo, contra núcleos de los elementos con números atómicos entre 94 y 98 para fusionarlos. Sólo podía darse la fusión si los dos núcleos chocaban con energía suficiente para superar la fuerza electrostática que hace que los protones de cada núcleo, dotados de carga positiva, se repelan entre sí. Para ello se requiere bastante energía, lo que determina un nuevo núcleo muy caliente. Calor que aumenta la probabilidad de que el nuevo elemento entre en fisión, en vez de "relajarse" y adquirir un estado estable donde persista intacto. Esta técnica generó los elementos entre

el 102 y el 106, de 1958 a 1974. Por encima del 106 la tendencia a fisionarse hacía imposible la síntesis de elementos nuevos.

Entonces, en 1974, uno de los autores (Oganessian) descubrió en el Instituto Conjunto de Investigaciones Nucleares (ICIN) de Dubna que, si se bombardeaban núcleos más ligeros con un haz de iones pesados, era posible producir núcleos con energías de excitación más bajas, gracias a lo cual se fusionarían y permanecerían intactos. A esto se le llama "fusión fría", pero no hay que confundirlo con el desacreditado proceso del mismo nombre que tanta publicidad recibió en los años ochenta. Las investigaciones basadas en este proceso comenzaron cuando se inauguró en 1975 el UNILAC (Acelerador Lineal Universal) de la Sociedad de Investigaciones de Iones Pesados de Darmstadt, que puede acelerar hasta iones muy pesados a energías variables.

Ocurre que en un experimento se producen pocos núcleos de los nuevos elementos deseados y acontece también que los núcleos "hijos" resultantes de la desintegración del nuevo elemento se desintegran tan deprisa, que deben ser detectados mientras el proceso de síntesis está todavía en marcha. En razón de ese doble fenómeno, los métodos existentes no podían registrar los elementos producidos con la nueva técnica; por eso transcurrieron varios años sin que se identificaran elementos nuevos.

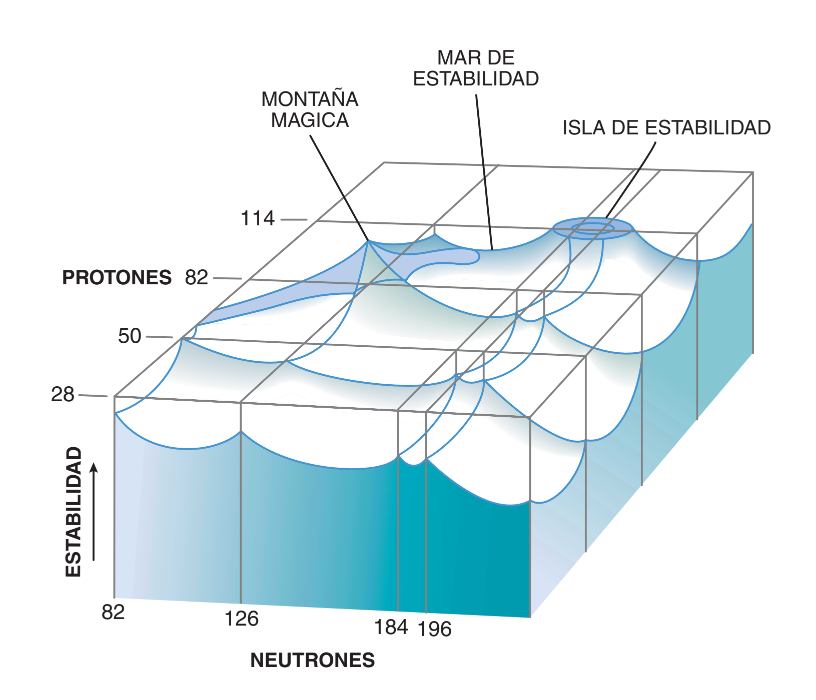
A principios de los años ochenta, un equipo de investigación de Darmstadt elaboró un método depurado y sensible para la identificación de nuevos núcleos de fusión. Sintetizó los elementos 107, 108 y 109. Cierto es que síntesis y detección tropezaron con barreras enormes: el grupo tuvo que utilizar el UNILAC durante dos semanas para producir un solo átomo del elemento 109. No obstante, ajustando mejor la intensidad del haz de iones y aumentando la sensibilidad de los detectores, ese mismo equipo produjo el elemento 111 en 1994 y el 112 en 1996. El elemento 112 tiene una semivida de 240 microsegundos; en 25 días sólo se produjeron dos átomos de ese tipo.

Las propiedades asociadas a la desintegración de este isótopo dan a entender que los elementos superpesados quizá sean más estables aún de lo predicho.

Desde 1994 investigadores de Alemania, Estados Unidos y Rusia han añadido seis nuevos elementos a la tabla periódica, hasta llegar al 118. De estas síntesis la más importante ha sido la de algunos isótopos del 114 porque ha demostrado concluyentemente la existencia de una isla de estabilidad. Haber llegado a ella es tan importante porque ha corroborado la predicción teórica de que ciertos números "mágicos" de protones y neutrones crean núcleos ligados de manera muy estrecha, capas cerradas estables parecidas a las configuraciones electrónicas de las capas orbitales atómicas que dan a los gases nobles su comportamiento químico inerte y definen la periodicidad y reactividad de los elementos químicos.

Los números mágicos conocidos del modelo de capas nuclear, que corresponden, entre otros lugares de la tabla periódica, al plomo (82 protones y 126 neutrones), se dedujeron ya en 1948. La predicción en 1966 del siguiente número mágico, 114 protones y 184 neutrones, contradijo la teoría imperante: por entonces se esperaba que las semividas radiactivas de los elementos sintetizados, así como su estabilidad ante la fisión, disminuyese drásticamente al llegar núcleos cada vez más pesados. La predicción de los números mágicos llevó a conjeturar la existencia de una isla de especies nucleares de vida insólitamente larga en pleno mar de la inestabilidad.

Resulta tan difícil llegar a la isla porque esos núcleos tienen más neutrones por protón que cualquier núcleo estable conocido. Escogimos la reacción que más neutrones introducía en los núcleos sintetizados: irradiamos Pu-244 (plutonio 244) —el exótico isótopo más pesado del plutonio— con



2. EL OCEANO de los grandes núcleos contiene muchos especímenes, o isótopos, inestables. El núcleo atómico de un elemento tiene un número fijo de protones, pero suele haber diversas versiones, los isótopos, que difieren en el de neutrones y en el grado de estabilidad. En el caso de los núcleos de más de 106 protones, muchos de esos isótopos son bastante inestables y forman un "mar de inestabilidad". Siguiendo con la metáfora, un isótopo insólitamente estable del plomo, con 82 protones y 126 neutrones, es una especie de montaña mágica. Desde 1966 se afirma que existe una isla de estabilidad, en cuyo centro estaría un isótopo de 114 protones y 184 neutrones. Los químicos han alcanzado hace poco las costas de la isla al crear un isótopo de 114 protones y 175 neutrones.



un chorro intenso de iones de Ca-48 (calcio 48), un raro y caro isótopo rico en neutrones del calcio. Esperábamos que la fusión produjese un núcleo compuesto de 114 protones y 178 neutrones. Ese isótopo se hallaría en la máxima cercanía posible de la combinación de 114 protones y 184 neutrones, doblemente mágica.

Sabíamos que, si los núcleos de Ca-48 y Pu-244 chocaban con energía suficiente para vencer su mutua repulsión electrostática, la energía de excitación de los núcleos compuestos resultantes posibilitaría que al menos algunos de ellos no se fisionasen, habida cuenta de que la evaporación de tres neutrones —que deja un isótopo del elemento 114 con 175 neutrones— enfriaría los nuevos núcleos por debajo de la barrera de fisión.

En 40 días de irradiación sólo se creó un átomo del nuevo elemento superpesado.

Así se logró

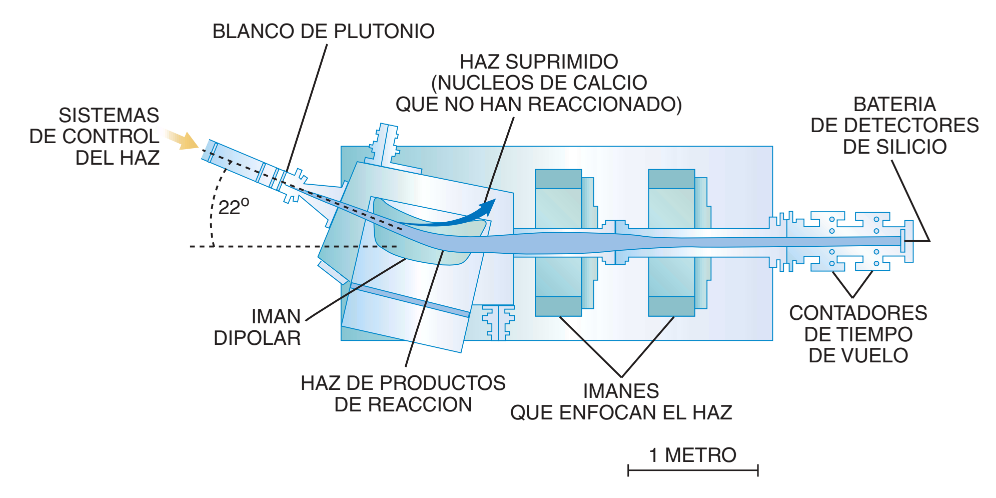
Siempre que se había intentado crear elementos superpesados por medio de reacciones similares se fracasó. En unas semanas, y ésa era una razón, sólo se produce un núcleo así, perdido además en un fondo de billones de otras especies nucleares. Al incrementar la sensibilidad de nuestro método de detección cientos de veces con respecto a los precedentes, detectamos los elementos recién sintetizados antes de que se desintegrasen.

Realizamos nuestro experimento en el ciclotrón de iones pesados del ICIN. Aceleramos iones de Ca-48 hasta rozar un décimo de la velocidad de la luz y enfocamos su haz en el blanco, constituido por varios miligramos de Pu-244 y electrochapado sobre pan de titanio.

Para detectar los nuevos núcleos fusionados que intentábamos sintetizar, necesitábamos separar los productos que nos interesaban de todos los demás generados en el experimento. Pero, ¿cómo? La huella esperada de la desintegración de nuestros núcleos superpesados era una serie de desintegraciones alfa, la del elemento 114 en el 112, la de éste en el 110 y la de éste en el 108, hasta que quedaba atrás la isla de estabilidad y se producía una fisión espontánea. Por desgracia, la desintegración alfa y los ritmos a los que se producen las fisiones de núcleos no queridos, pero generados también por el experimento, producen secuencias de sucesos aleatorios que remedan la secuencia de desintegraciones del elemento 114. Se engendran por segundo miles de millones de estos núcleos indeseados; en cambio, se esperaba que la tasa de producción del isótopo 114 no llegara a un átomo al día. Por eso nos era de importancia vital la supresión de esas reacciones de fondo espurias, si queríamos reconocer la reacción del elemento 114 cuando se produjera.

Manos a la obra, se preparó en Dubna un separador relleno de gas, capaz de transmitir los productos que buscábamos. Nos dio una detección muy nítida de las secuencias de desintegración radiactiva que revelaban su presencia; también suprimió los productos indeseados. Los iones pesados producidos por la fusión (una mezcla de los núcleos de 114 sintetizados y de otros productos de fusión) saltan del blanco y entran en una cámara llena de hidrógeno gaseoso, confinado a baja presión entre las caras polares de un imán dipolar. Los iones pesados que vienen del blanco interaccionan con los átomos de hidrógeno; aquellos cuyos electrones estén enlazados a sus núcleos con menos energía que la aportada por la colisión tenderán a perderse. Se ajusta el campo magnético de forma que sólo los núcleos que interesan alcancen a la batería de detectores. Las partículas del haz de Ca-48 que no han reaccionado entran en el hidrógeno con una velocidad elevada y están tan ionizados, que el campo magnético los desvía del camino de las partículas que estamos buscando. El separador relleno de gas suprime también en muy gran medida otros productos indeseados de las reacciones nucleares periféricas.

Los productos de reacción que salen de los imanes dipolares se concentran con una serie de cuadrupolos magnéticos, pasan a continuación por un



3. EL LABORATORIO DE DUBNA (*izquierda*) crea haces que avanzan de derecha a izquierda en la foto. A la izquierda de ésta se encuentra el separador de masas relleno de gas (*arriba*). El imán dipolar dobla los haces de los productos de reacción procedentes del blanco de plutonio; los núcleos que interesan se dirigen hacia una batería de diminutos detectores de silicio. Los investigadores asocian las desintegraciones nucleares que se producen allí con las posiciones donde suceden, para determinar qué isótopos se crearon en el blanco.

contador de tiempo de vuelo (CTV) y se entierran por sí solos en un detector sensible a la posición. Con la señal del CTV podíamos distinguir entre el impacto de los productos que pasaban por el separador y la desintegración radiactiva de los productos que ya estaban implantados en el detector. El tiempo de vuelo a través del CTV puede utilizarse para discriminar entre los números atómicos altos y bajos. Además, el detector sensible a la posición disminuía el ritmo de las interferencias del fondo, porque gracias a él podíamos identificar e ignorar reacciones indeseadas. Estos medios nos permitieron detectar y medir los núcleos del elemento 114 que buscábamos.

En el desarrollo del primer experimento tardamos 40 días, entre noviembre y diciembre de 1998. En ese intervalo observamos las señales de un total de tres desintegraciones por fisión espontánea, lo que indicaba que se habían sintetizado y habían pasado por el separador antes de fisionarse tres núcleos compuestos. Dos de ellos duraron alrededor de un milisegundo, cada uno; eran reacciones indeseadas procedentes de la desintegración de los núcleos de Am-244 (americio 244). Sólo uno de esos sucesos (¡un átomo en 40 días de irradiación!) se trataba de un implante en el detector seguido por tres desintegraciones alfa (la pérdida sucesiva de dos protones y dos neutrones, cada una de ellas una desintegración que engendraba un elemento con un número atómico inferior), todo en la misma posición de la batería de detectores.

Esta era la signatura de desintegración que esperábamos: las relaciones entre las energías y los tiempos de desintegración eran coherentes con lo previsto por la teoría para la desintegración del elemento 114 y de los elementos que engendra. El tiempo de vuelo de los núcleos procedentes del blanco y la energía con que se implantaron en el detector también concordaban con las predicciones, y los ritmos aleatorios captados por el detector indicaban que la probabilidad de que el suceso se debiese a correlaciones aleatorias de sucesos de fondo era de menos de un 1 por ciento.

La cadena de desintegración

El isótopo del elemento 114 con 175 neutrones tiene una semivida de 30,4 segundos. Se desintegra en el elemento 112, que, con una semivida de 15,4 minutos, se desintegra en el 110; éste, 1,6 minutos de semivida, se desintegra en el elemento 108. El isótopo de 169 neutrones de éste cae fuera del borde de la isla de estabilidad y se desintegra con una fisión espontánea. En un experimento posterior realizado en Dubna se obtuvo un isótopo más ligero del elemento 114, con 173 neutrones, que está más cerca del borde de la isla de estabilidad. Tiene una semivida de unos cinco segundos y sufre una desintegración alfa que engendra núcleos de elemento 112; éstos se desintegran por fisión espontánea en tres minutos.

Hemos confirmado la existencia de la isla de estabilidad y medido la magnitud de sus consecuencias. La vida media de nuestro isótopo del elemento 114 con 175 neutrones es más de mil veces mayor que la del isótopo con 174 neutrones, que se produce en el marco de la cadena de desintegración del elemento 118 y se ha descubierto hace poco en el Laboratorio Nacional Lawrence, de Berkeley. La vida de nuestro isótopo del elemento 112 con 173 neutrones es más de un millón de veces más larga que la del isótopo con 165 neutrones descubierto en Darmstadt en 1996. Estas semividas mayores de nuestros productos de fusión sintéticos hacen que sea más fácil estudiarlos. De su investigación podría resultar un nuevo enfoque de las propiedades fundamentales de la materia.

Hace poco creamos también el isótopo del elemento 114 de 174 neutrones (del cual hemos hecho hasta ahora un imponente total de dos átomos). Las propiedades de desintegración de este isótopo dan a entender, posibilidad apasionante, que los elementos superpesados quizá sean más estables incluso que lo predicho por la teoría. A la luz de nuestro experimento y de los trabajos de otros, el futuro del estudio de los límites de la estabilidad nuclear parece brillante; se abren muchas perspectivas de nuevas investigaciones y descubrimientos inesperados. Con un esfuerzo concertado, podremos ser capaces incluso de superar, para el elemento 114, una de las dificultades más arduas y tradicionales de la síntesis de elementos superpesados: ¡encontrar un nombre para el nuevo elemento con el que estén de acuerdo todas las partes interesadas!

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SEARCH FOR THE MISSING ELEMENTS. Glenn T. Seaborg y Walter Loveland en *New Scientists*, vol. 131, núm. 1784, pág. 29, agosto de 1991.

TRANSURANIUM ELEMENTS: A HALF CENTURY. Dirigido por Lester R. Morss y J. Fuger. American Chemical Society, 1992.

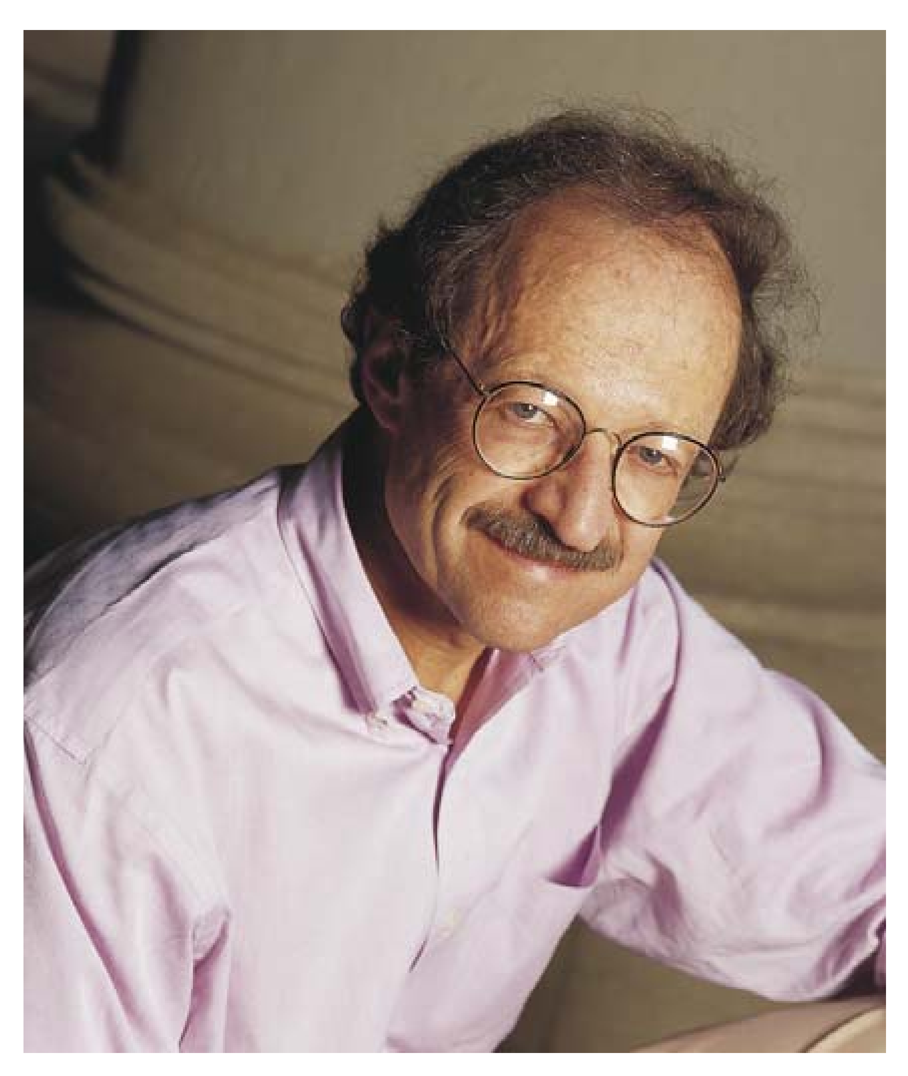
LA SÍNTESIS DE LOS ELEMENTOS SUPERPESADOS. Peter Armbruster en *Investigación y Ciencia*, noviembre de 1998.

Tim Beardsley

HAROLD E. VARMUS: Del laboratorio a la administración

Cuando Harold E. Varmus, médico y profesor de microbiología, se trasladó a Washington en 1993 para tomar posesión de la dirección del Instituto Nacional de la Salud (NIH), toda la experiencia de gobierno que tenía era haber gestionado un laboratorio de 25 personas. Había sido en la Universidad de California en San Francisco.

La constelación de centros federales de investigación que conforman el NIH, con sede en Bethesda, contaba a la llegada de Varmus con un presupuesto de 10.300 millones de dólares. Cuando dejó el puesto el pasado mes de diciembre para asumir la presidencia del Centro Memorial Sloan-Kettering de Investigación Oncológica de Nueva York, el presupuesto del NIH ascendía a 15.600 millones de dólares, un notable incremento para una época de recortes. La magnanimidad del congreso con el NIH cabe atribuirla a la destreza de Varmus para cultivar buenas relaciones con el poder legislativo por encima de las barreras partidistas. Habilidad resaltada, coinciden los observadores, por su condición de premio Nobel: compartió el más codiciado galardón de la ciencia con Michael Bishop en 1989 por su trabajo sobre oncogenes en retrovirus.



1. El prestigio científico y la habilidad para lograr el consenso le permitieron a Harold E. Varmus devolver su vigor a la primera institución de investigación biomédica de los Estados Unidos

Varmus ofreció salarios competitivos para recobrar la decadente moral de la institución y reclutar a los investigadores más prestigiosos contratándolos como funcionarios a tiempo parcial. La investigación clínica, que estaba en declive, ha cobrado auge, y se avecina una ola de construcción de instalaciones. "Es el primer director del NIH de categoría científica internacional, y eso imprime autoridad", comenta Robert A. Weinberg, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, que estudia los genes involucrados en el cáncer.

Varmus no ha rehuido la controversia, imposible, por otro lado, en un cargo más político que científico. Harold Freeman, presidente del Hospital General de Harlem y director del comité presidencial del cáncer, dice que a pesar de la "excelente" actuación de Varmus, la institución (y la sociedad en general) no hacen lo suficiente para transformar los descubrimientos en tratamientos que sirvan a la gente real y en su situación concreta. Sobre el NIH llovieron las críticas, hace poco, desde un informe del Instituto de Medicina. Lo acusaban de carecer de un plan estratégico y de un presupuesto adecuado para coordinar la investigación sobre el cáncer entre las minorías étnicas. Varmus dice que él está "tan preocupado como el que más" por las privaciones médicas que padecen las minorías.

También ha irritado a los editores de revistas académicas impulsando un plan para que el NIH establezca un sistema de distribución por Internet de artículos sin revisión previa, a fin de propagar con celeridad mayor los datos y reducir los costes de las bibliotecas. El plan, con el nombre cambiado y de ámbito más reducido que el previsto originalmente por

Varmus, ha comenzado bajo la denominación PubMed Central. Aunque distribuirá artículos revisados por censores que se hayan publicado en las revistas, añadirá algunos artículos sin revisar, si bien no exentos de cierta criba.

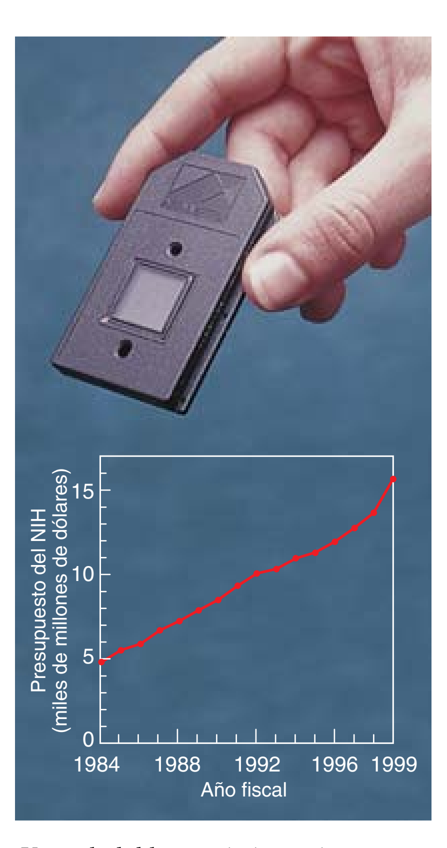
Varmus, de 60 años, ha superado, según todos los cánones, el difícil ejercicio del equilibrio en la cuerda floja burocrática. Entrevistado en un perfecto día otoñal poco después del anuncio de su inminente partida, parecía gozar de un magnífico humor, sin corbata y diligente. Se levanta decidido en busca de un documento o para comprobar si le ha llegado correo electrónico. Se nota que está "en forma". En el NIH, iba a trabajar en bicicleta la mayoría de los días, recorriendo 20 kilómetros; otras veces comenzaba la jornada remando.

La historia intelectual de Varmus se aparta de lo acostumbrado. Hijo de médico, se graduó en literatura inglesa en la Universidad de Harvard. Pasó luego a la carrera de medicina. Se maravilló ante el poder de la ciencia para proporcionar tratamientos racionales; por ejemplo, suministrar una hormona a un paciente cuyo organismo no puede sintetizarla. Pero le llamó más la atención la escasa aplicación real de los principios científicos, considerando la vastedad de nuestros conocimientos.

Durante su estancia en el NIH, Varmus se las ha visto con quienes querían que las partidas se repartieran en función de la mortalidad y efectos incapacitantes de las patologías. No se opone a dar cuenta de los gastos, pero asegura que su cargo le obliga a encauzar los dineros hacia donde vea más oportunidades científicas, consciente de que resulta punto menos que imposible aventurar qué pacientes se beneficiarán de una determinada línea de investigación. Intentando alcanzar un consenso más amplio, Varmus, entre otras medidas, ha ampliado la participación social con la creación de un nuevo consejo de representantes de la ciudadanía. También ha recabado de expertos foráneos el examen del procedimiento seguido por el NIH para otorgar financiación; el criterio del reparto constituye la principal fuente de descontento entre los investigadores, que se sienten incomprendidos en sus ideas más arriesgadas o novedosas. Aboga por la reorganización en seis grandes institutos de los 25 ahora existentes. Cree que las instituciones de cierta capacidad son con frecuencia más innovadoras que las pequeñas y advenedizas.

Como muchos otros investigadores en el campo de la medicina, Varmus cree que en el nuevo decenio comenzarán a cosecharse frutos tangibles en forma de rápidos avances en el conocimiento de las bases moleculares de las enfermedades. Admite que la terapia génica avanza más lentamente de lo que los investigadores —y el público— esperaban. Pero está seguro de que los desarrollos farmacéuticos tradicionales también se verán beneficiados por el Proyecto del Genoma Humano.

Está particularmente impresionado con las posibilidades de las técnicas de reconocimiento genético inmediato, que en su barrido detectan variaciones en el ADN individual de posible significado en la prognosis y la diagnosis. Una mejor clasificación de las patologías con frecuencia lleva a resultados más satisfactorios en los tratamientos, porque entonces los médicos tienen una idea más clara de cuáles tendrán más probabilidad de resultar efectivos, si es que hay alguno. El trasplante de médula ósea, cuya validez para el cáncer de mama ha sido puesta en entredicho, podría ser eficaz para algunas pacientes, sugiere. Pero la sociedad, aconseja, tendrá que proporcionar protección contra la discriminación y la pérdida de intimidad antes de que la técnica de reconocimiento desenvuelva todo su potencial.



Un saludable crecimiento impera en el presupuesto del Instituto Nacional de la Salud, donde Varmus promocionó las sondas GeneChip (arriba) *y otras técnicas*

Los científicos, del mismo modo, deberán adaptarse a una nueva forma de llevar a cabo su cometido. Muchos investigadores se han vuelto "adictos a un modelo de industria casera" en la investigación biomédica. Varmus cree firmemente que la biomedicina necesita ahora informáticos para establecer bases de datos e ingenieros para desarrollar nuevas herramientas, en no menor proporción que los laboratorios tradicionales. El NIH mantiene la investigación en las empresas así como en las universidades y en su propia sede, pero el científico que hay en Varmus se muestra inquieto por la expansión del mercantilismo que deturpa la investigación. Las instituciones con ánimo de lucro, dice, se vuelven paulatinamente posesivas con sus descubrimientos e imponen restricciones cada vez más onerosas a los científicos que desean intercambiar útiles de investigación tales como animales transgénicos, clones y cepas celulares, incluso los que se han desarrollado con financiación pública.

Parte del problema, especula, podría ser una creciente tendencia de las instituciones a patentar los inventos a la primera, mucho antes de que se haya creado nada de utilidad práctica. "No estoy convencido de que debieran proceder así con las patentes", señala. Pero admite la necesidad de preservar los incentivos para animar a los clínicos a que desarrollen, por ejemplo, nuevas pautas de tratamiento.

Varmus tendrá cumplidas oportunidades para lidiar con esos toros en el Sloan-Kettering. Los observadores familiarizados con la oncología ponderan el espléndido programa de investigación básica de esa institución, pero se muestran más reticentes a propósito de sus incursiones clínicas. Es la tarea que espera a Varmus. Su autoridad gestora y científica, unida a su manifiesto instinto para buscar el consenso, puede que sea justo lo que se necesite para persuadir a la industria, los aseguradores y los investigadores a empujar en la misma dirección.

Motores moleculares

Diseño y síntesis

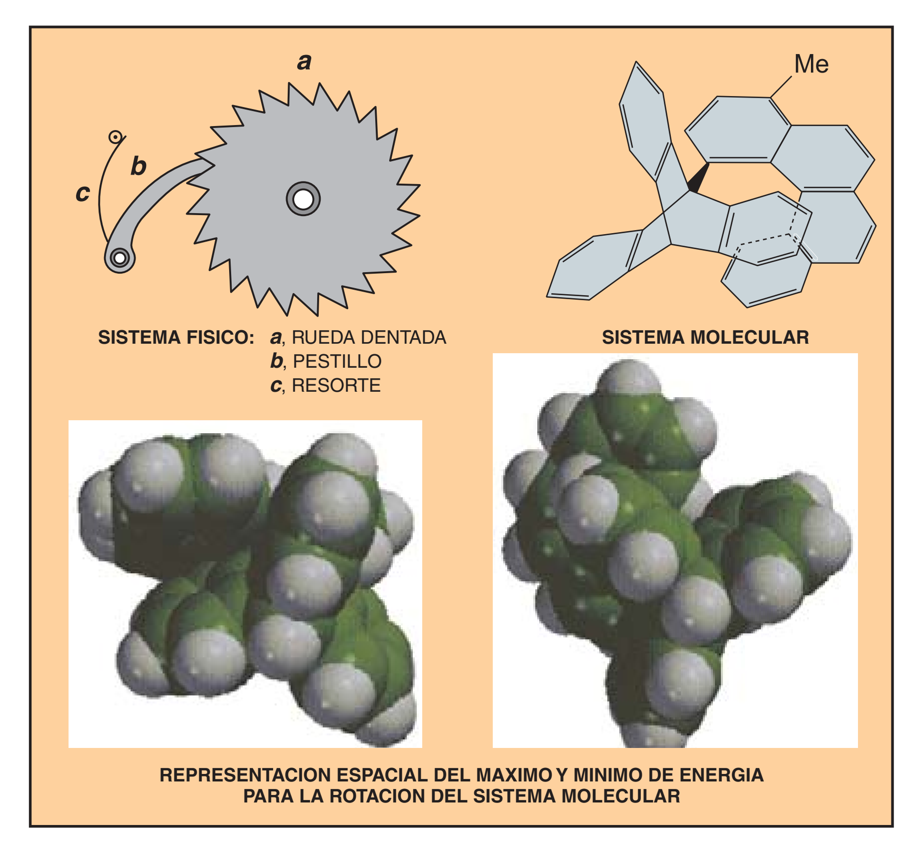
El movimiento coordinado es fundamental en la vida. En el dominio macroscópico los motores convierten energía en movimiento mediante procesos identificados. Menos conocidos son los sistemas moleculares inductores de movimiento, por ejemplo el de las bacterias o el de contracción muscular. En el propio tamaño molecular estriba una de las dificultades para su estudio, que debe acometerse con microscopios de gran resolución.

La construcción de motores moleculares constituye un auténtico reto. El afán por desarrollar sistemas moleculares que realicen funciones análogas a las observadas en el mundo macroscópico, ha llevado a la preparación de dispositivos moleculares que simulan engranajes, torniquetes, redes, frenos, tubos y otros mecanismos. En alusión a sus dimensiones nanométricas, se llama nanotecnología la disciplina que se ocupa del creciente número de artilugios moleculares aplicados en sistemas físicos y químicos.

Durante los últimos años T. Ross Kelly ha investigado la preparación de motores moleculares. En 1994 preparó un freno molecular y más recientemente un sistema molecular, semejante a un sistema físico de poleas muy común en el transporte de materiales pesados. El sistema físico a emular consta de una rueda dentada, un pestillo (que permite el movimiento en una sola dirección) y un resorte (que mantiene el pestillo entre los diferentes dientes de la rueda).

En sistemas biológicos existen motores moleculares como el que produce el movimiento de las bacterias que se basan en la rotación coordinada.

El dispositivo molecular ideado por Kelly está compuesto por un tripticeno y un benzo[c]fenantreno. El tripticeno, estructura molecular constituida por tres anillos bencénicos, actúa de rueda; el benzo[c]fenantreno, estructura molecular helicoidal que consta de cuatro anillos bencénicos fusionados, cumple la función de pestillo y resorte a la vez. El conjunto se integra en una sola molécula.



Representaciones del motor físico y molecular

El motor molecular opera merced a la estructura helicoidal que poseen los benzo[c]fenantrenos, una conformación idónea para el movimiento rotatorio unidireccional. Así lo confirman las estimaciones de las barreras de energía de rotación en ambos sentidos.

Después de lograr la síntesis de este sistema molecular se comprobó experimentalmente, mediante técnicas de resonancia magnética nuclear (RMN), que el tripticeno no gira a temperatura ambiente; ahora bien, cuando se calienta hasta 160 grados Celsius la rotación se produce en ambos sentidos por igual. El hipotético motor se comporta como un rotor.

Aunque el sistema molecular integra todas las piezas del sistema físico y es correcto el planteamiento teórico de Kelly, no resulta adecuado el tipo de energía utilizado para hacer rotar el tripticeno. Si el aumento de temperatura del sistema se tradujera en el movimiento unidireccional del tripticeno, el sistema molecular estaría violando el segundo principio de la termodinámica. En un proceso químico irreversible el balance de entropía siempre es positivo.

Se ha logrado, pues, ensamblar en un sistema molecular los componentes de un sistema físico —el de poleas—, pero no ha sido posible producir un movimiento unidireccional del sistema mediante el suministro de energía térmica. La energía térmica no puede dirigirse exclusivamente hacia un movimiento de traslación o de rotación; promueve también movimiento de vibración y otros, que impiden que el trinquete actúe de manera eficaz.

Para solucionar estos problemas, Kelly y su grupo han modificado recientemente el sistema molecular de forma tal, que el tripticeno rota impulsado por energía química suministrada por fosgeno, en un proceso similar al que ocurre en las células con el consumo de ATP.

JOSÉ PÉREZ SESTELO
Facultad de Ciencias
Universidad de La Coruña

Polen

Criterio sistemático

El grano de polen constituye el gametofito masculino de las Fanerógamas. Tiene por función principal producir y trasladar, una vez liberado, los gametos masculinos desde la antera donde se originó hasta el óvulo.

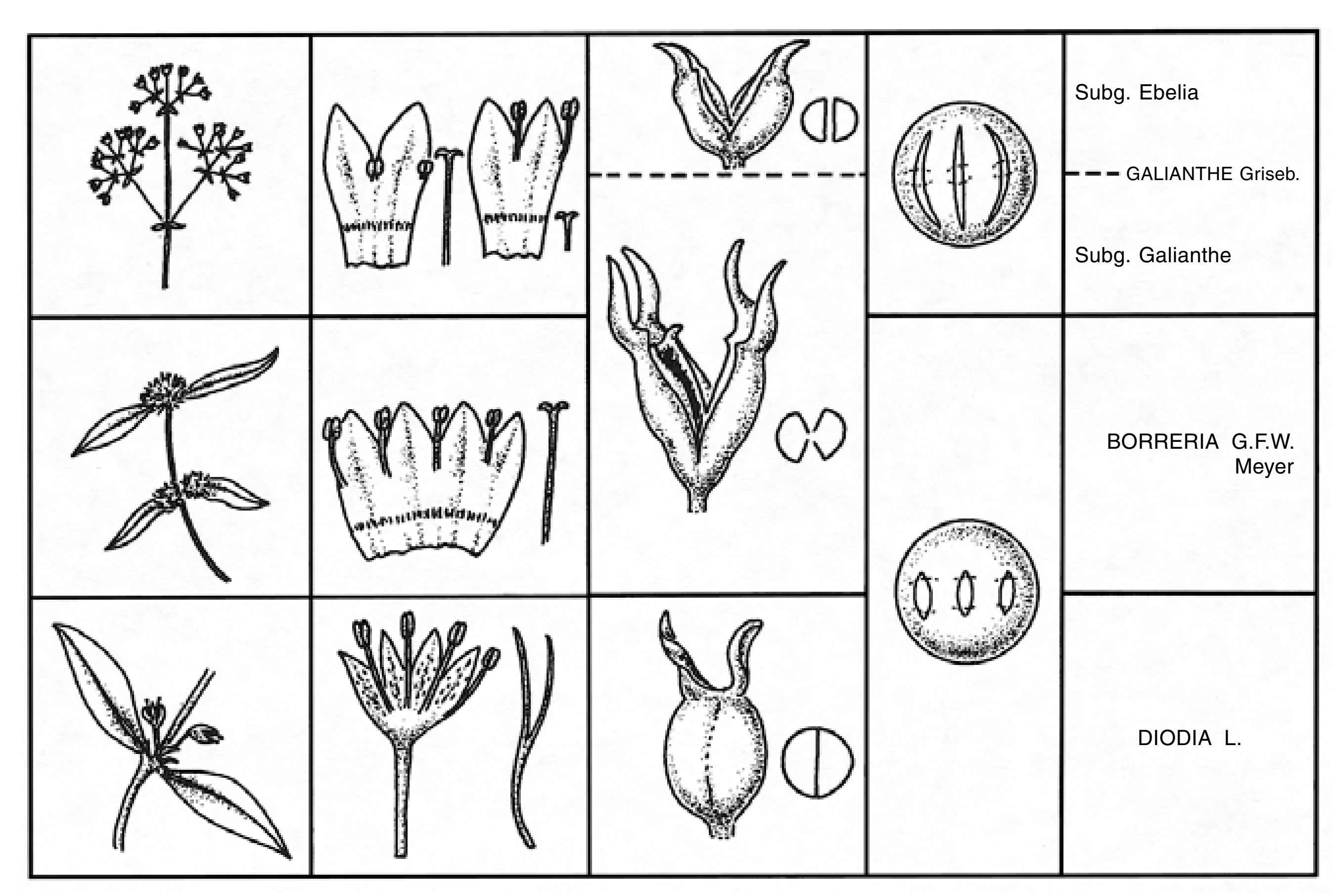
El término *polen* proviene del latín *pollen-inis*, que significa "polvo muy fino". Lo introdujo Linneo en alusión a su apariencia. En 1944 Hyde y Williams acuñaron el término "palinología" para denominar la parte de la botánica que se dedica al estudio de los granos de polen y, por extensión, a las esporas de los vegetales.

La morfología de los granos de polen presenta una inmensa posibilidad de variables, en forma y tamaño de los granos, tipo, número y disposición de las aberturas, estructura y escultura de la pared (exina). Diversidad que da por resultado tipos polínicos muy diferentes, según puede apreciarse con la aplicación del microscopio electrónico de barrido (MEB) y del microscopio electrónico de transmisión (MET).

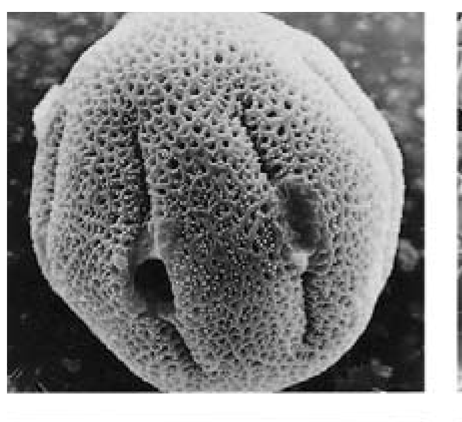
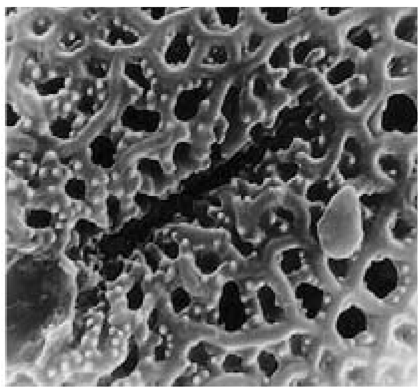
Desde 1965 el microscopio electrónico de barrido permitió observar la cubierta del polen desde un punto de vista tridimensional y con aumentos que van de 10 a 200.000. El microscopio electrónico de transmisión, con un alto poder de resolución (0,002 µm), unas 1000 veces superior al del microscopio óptico, permite analizar la ultraestructura de la pared.

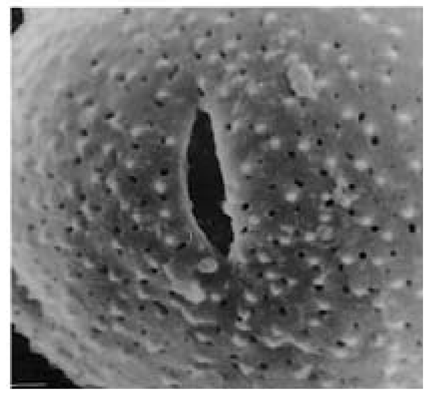
La diversidad morfológica y la relativa fijeza de sus caracteres hacen del polen elementos de valiosa utilización en la taxonomía y filogenia vegetal. Ya en 1928 R. P. Wodehouse señaló que "en ningún órgano vegetal se encuentran reunidos, en tan poco espacio, la cantidad de caracteres de valor filogenético como en un grano de polen". En su nuevo sistema de clasificación A. Cronquist utiliza el número de aperturas y de núcleos que poseen los granos al ser liberados de las anteras para diferenciar las subclases de *Magnoliopsida* (Dicotiledóneas) y *Liliopsida* (Monocotiledóneas).

Cada familia de plantas, género y, a veces, especie tienen un polen que le es característico. Hay familias, llamadas *estenopalínicas* (Gramíneas, Chenopodiáceas, Crucíferas), en las que el polen es bastante uniforme en sus caracteres y resulta difícil encontrar diferencias significativas entre los géneros. Otras en cambio, que reciben nombre de *euripalínicas* (Compuestas, Leguminosas, Rubiáceas),



1. Diferencias y afinidades entre los géneros Galianthe, Borreria *y* Diodia s.str. *sobre la base de caracteres exomorfológicos (inflorescencia, flor y fruto) y palinológicos.* Galianthe *se diferencia de los otros dos géneros por presentar inflorescencias terminales y laxas (tipo tirsoide), flores heterostilas (longistilas y brevistilas) y granos de polen con colpos largos y exina bi-reticulada. Los frutos, dehiscentes, pueden tener mericarpos cerrados (*G. *subg.* Ebelia*) o abiertos (*G. *subg.* Galianthe*).* Borreria *y* Diodia*, en cambio, presentan inflorescencias contraídas, con muchas flores reunidas en cabezuelas en el primero o con pocas flores, en el segundo. En ambos géneros las flores son homostilas y el polen posee aberturas o colpos cortos y exina tectada-perforada. En* Diodia *los frutos son indehiscentes, mientras que en* Borreria *son dehiscentes (similares a los de* G. *subg.* Galianthe*). Las características del polen permiten diferenciar* Galianthe *de géneros afines y del resto de las Rubiáceas*



2. *En* Galianthe (arriba) *la estructura de la pared de los granos, semitectada, constituida por un retículo primario* (muros lisos) *y un retículo secundario* (muros espinulados) *a un nivel más bajo que el anterior, es el principal carácter diacrítico para separarlo de* Borreria (abajo) *y* Diodia s. str. *cuyos granos son tectado-perforados. Fotografías tomadas con microscopio electrónico de barrido, vistas generales de los granos ×2000, detalles de la superficie, ×10.000*

poseen una gran variación en los caracteres del polen; las diferencias pueden llegar a nivel de especie.

Dentro de las Rubiáceas, la tribu Spermacoceae es una de las que presenta mayores dificultades en la delimitación de sus géneros. De su revisión se han ocupado Nélida Bacigalupo, del Instituto de Botánica Darwinion en San Isidro, y Elsa Cabral, del Instituto de Botánica del Nordeste en Corrientes. Para auxiliarles en la discriminación de especies la autora se ocupa del análisis del polen.

Dentro de esta tribu, el género *Galianthe*, establecido por Grisebach en 1879, engrosó en otros una sección o subgénero de *Borreria* Meyer. Pasó más de un siglo (1991) para que se demostrara que, entre ambos géneros, había suficientes diferencias morfológicas, citológicas y palinológicas. El polen aportó datos contundentes que apoyan la separación de *Galianthe* como género independiente. Las principales diferencias se encuentran en los caracteres de las aberturas y de la pared del grano.

En *Galianthe* se estudiaron una treintena de especies. En todas los granos son 6-8 zonocolporados, con colpos predominantemente largos, y la exina es semitectada-reticulada. Al microscopio electrónico de barrido se observa que el retículo es complejo (bi-reticulado), formado por un retículo primario y un retículo secundario a un nivel más bajo que el anterior [dentro de las Rubiáceas este tipo de estructura se presenta únicamente en este género].

Borreria, un género muy amplio, presenta una gran variación en la morfología de los granos. Admite hasta 11 tipos polínicos; no obstante, la estructura de la exina, tectada-perforada, se mantiene constante en casi todas las especies estudiadas. Por las aberturas pueden ser porados (poros dispuestos sobre el ecuador o distribuidos en toda la superficie) o colporados, con unos colpos cortos.

En el estudio de las especies americanas de *Borreria*, *Diodia* y *Spermacoce*, Cabral y Bacigalupo encontraron que algunas especies (*Borreria dichasia*, *Diodia brasiliensis*, *D. cymosa*, *D. dichotoma*, *D. hispidula* y *Spermacoce bogotensis*) no reúnen los caracteres propios de estos géneros y proponen separarlas y subordinarlas a *Galianthe* por presentar inflorescencias amplias, flores dimorfas y frutos dehiscentes. Puesto que en estas especies los mericarpos son indehiscentes y en *Galianthe* son dehiscentes, proponen además, ampliar los límites del género e incluir estos taxones en *Ebelia*, un nuevo subgénero de *Galianthe*.

El polen respalda esa propuesta. En este grupo de especies los granos son 7-9 colporados, con colpos predominantemente largos y exina semitectada-reticulada, el retículo puede ser complejo (bi-retículo) o simple. Estos caracteres, típicos de *Galianthe*, permiten diferenciarlas y separarlas de los otros géneros donde se incluían con anterioridad.

La utilización del polen para reforzar la revalidación de *Galianthe*, por un lado, y la creación del nuevo subgénero *G.* subg. *Ebelia*, por otro lado, son sólo ejemplos aislados de la importancia que pueden tener los caracteres palinológicos en taxonomía.

STELLA MARIS PIRE
Facultad de Ciencias Exactas
y Naturales y Agrimensura
Univ. Nac. del Nordeste,
Corrientes, Argentina

El cemento aluminoso

Resolución de su estructura cristalina

A finales del siglo pasado apareció el cemento aluminoso. Fue en Francia y con él se pretendía salir al paso de los problemas de desintegración que presentaba el cemento portland expuesto en medios sulfatados. Además de resistencia a los sulfatos, el cemento aluminoso presentaba buenas propiedades refractarias y un tiempo de fraguado mucho menor que el del cemento portland. Gracias a esta última propiedad, el cemento aluminoso permitía fabricar vigas, columnas y otros elementos estructurales en menos tiempo.

El cemento aluminoso se obtiene de la fusión de roca caliza y bauxita. El producto resultante consta de la

fase $CaAl_2O_4$ y, en menor cuantía, de las fases $Ca_{12}Al_{14}O_{33}$, Ca_2AlFeO_5, $Ca_2Al_2SiO_7$ y β-Ca_2SiO_4. En contacto con el agua, y a una temperatura inferior a 20 ºC, la fase principal del cemento aluminoso reacciona para formar la fase hexagonal, conocida como $CaAl_2O_4 \cdot 10H_2O$ o CAH_{10} en la notación cementera. Esta fase mayoritaria en el cemento hidratado es inestable y se transforma con el paso de los años.

Los productos resultantes —fase cúbica y gibbsita— son más densos que la fase hexagonal, por cuya razón el cemento aluminoso transformado presenta una porosidad mayor que el original. El aumento de porosidad debilita la resistencia mecánica del hormigón fabricado con este cemento. Además, el hormigón es más vulnerable a la circulación de fluidos por su interior, lo que acelera el proceso de degradación.

A diferencia de lo que sucede con el cemento portland, el hormigón de cemento aluminoso debe elaborarse con una proporción de agua a cemento inferior a 0,4, para minimizar al máximo el efecto de la transformación anterior. Si se ha procedido a una preparación correcta, el hormigón de cemento aluminoso presenta una resistencia mecánica igual a la del hormigón de cemento portland al cabo de unos cinco años.

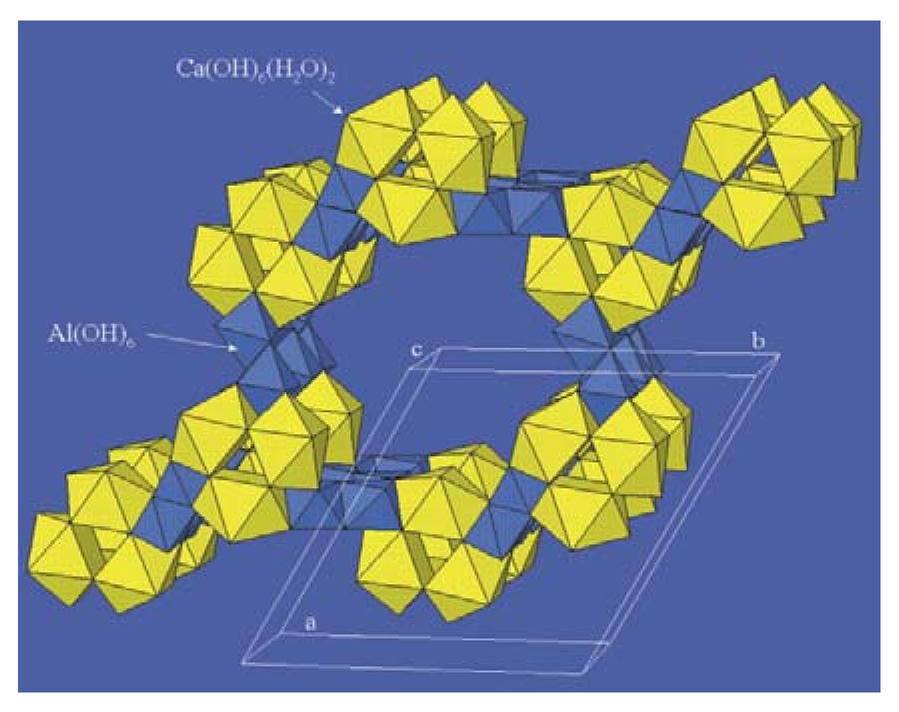
En 1973 aparecieron en el Reino Unido los primeros problemas del empleo del cemento aluminoso en elementos de hormigón prefabricados. Se habían desplomado los techos de tres edificios públicos. El suceso se repitió en varios países y, más recientemente, en 1990, un edificio se hundió parcialmente en Barcelona. Ello ha motivado que las distintas administraciones públicas se hayan comprometido a confeccionar un censo general de todos los edificios elaborados con cemento aluminoso para establecer su estado de conservación.

En España la investigación llegó a la conclusión de cuán deficiente era lo que se sabía de las características del cemento aluminoso. En particular, se desconocía por completo su estructura cristalina, que nos habría de permitir comprender la inestabilidad del cemento y facilitar su aplicación posterior.

Las estructuras cristalinas se resuelven a partir de monocristales de cierto tamaño mediante difracción de rayos X. En nuestro caso, debido al complejo mecanismo de hidratación de la fase hexagonal, resultaba imposible obtener un monocristal. Se optó por resolver la estructura a partir de las intensidades de difracción del material policristalino. La información estructural obtenida por este método acostumbra ser muy pobre, útil sólo para estructuras sencillas. Pero gracias al perfeccionamiento reciente de los métodos de resolución, hemos logrado obtener la estructura.

El espectro de difracción de rayos X de la fase $CaAl_2O_4 \cdot nH_2O$ pura se obtuvo en un difractómetro de polvo de alta resolución provisto de ánodo rotatorio y monocromador primario curvo del Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (CSIC). Una vez extraídas las intensidades integradas del diagrama de polvo, se procedió a la determinación de las fases asociadas (un proceso parecido al de focalización en el caso de microscopía electrónica). Dicha determinación se realizó mediante la aplicación iterativa de la relación fundamental entre las fases, denominada "fórmula de la tangente", modificada e introducida en el programa XLENS. La imagen de densidad electrónica resultante mostró todos los átomos de la estructura, excepto los de aluminio, cuyas posiciones dedujimos a partir de consideraciones cristaloquímicas.

La idoneidad del modelo se confirmó mediante la concordancia entre el perfil de difracción calculado y el observado, así como mediante el balance electrostático de los cationes (Ca y Al) y aniones (OH). Con anterioridad se había ya analizado esa sustancia mediante difracción de neutrones en el Laboratorio Leon-Brillouin de París, sin éxito.



La estructura de la fase $CaAl_2O_4 \cdot nH_2O$ la forman anillos de tres poliedros $Ca(OH)_6(H_2O)_2$ (color amarillo) *a una altura de 1/4**c** que se unen a los anillos situados en 3/4**c** mediante dos octaedros $Al(OH)_6$* (color azul). *Esta disposición de los octaedros de calcio y aluminio da lugar a un canal a lo largo del eje **c** en donde se sitúan moléculas de H_2O. Además del canal principal, existe un sistema menor de tres canales que se cortan en ángulos de 60 grados, paralelos al plano **ab** y situados en 1/4**c** y 3/4**c**. En estos canales se ubican moléculas de agua encima de los poliedros de calcio. La estructura resultante es considerablemente abierta y parece ser que el edificio cristalino se mantiene por la presencia de las moléculas de agua en los canales. Cuando las condiciones de humedad relativa y temperatura varían, la estructura pierde parte de las aguas y la estructura colapsa para formar fases más estables: $Ca_3Al_2(OH)_{12}$ y gibbsita. En el proceso de transformación se mantienen las esferas de coordinación de ambos cationes Ca y Al, con la salvedad de que el calcio pierde dos H_2O según: $Ca(OH)_6(H_2O)_2 \rightarrow Ca(OH)_8$. Es posible que la pérdida de las dos moléculas de H_2O del calcio determine la estabilidad de este compuesto*



Vista del interior de un edificio de apartamentos hundido en Barcelona, en 1990. (Cortesía de J. R. Rossell)

La resolución de la estructura del compuesto principal del cemento aluminoso hidratado permitirá establecer los mecanismos de su transformación y estabilidad. Servirá ello para mejorar las prestaciones de este cemento aluminoso.

SALVADOR GALÍ I MEDINA
Universidad de Barcelona
FRANCESC GUIRADO I GISPERT
Universidad Rovira i Virgili
JORDI RIUS I PALLEIRO
Instituto de Ciencia de los Materiales de Barcelona (CSIC)

Atomos artificiales

Y sus propiedades

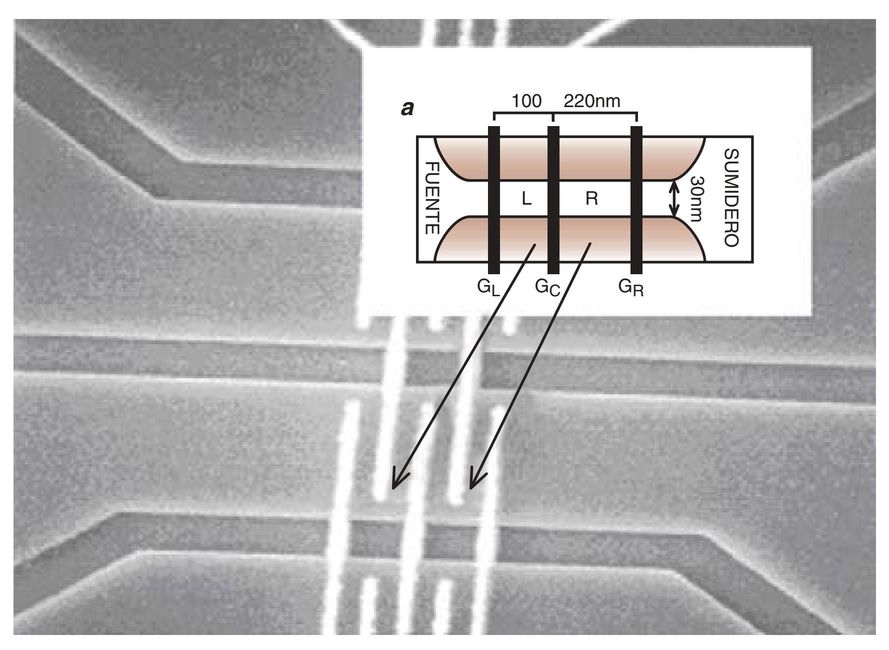
La progresiva miniaturización de dispositivos de estado sólido hasta escalas nanométricas —un nanómetro es una millonésima parte de un milímetro— nos lleva a preguntarnos sobre las nuevas propiedades fundamentales de estos sistemas a medida que reducimos su tamaño.

En particular, los dispositivos electrónicos cuánticos aprovechan las propiedades cuánticas de los electrones confinados en pequeñas regiones de un sólido [*véase* "Electrones balísticos en semiconductores", por Mordehai Heiblum y Lester F. Eastman, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1987]. Entre este tipo de dispositivos se encuentran, por ejemplo, el diodo de efecto túnel resonante (basado en el confinamiento de electrones en pozos cuánticos), los circuitos de uniones Josephson superconductoras (basados en la coherencia macroscópica de la fase del superconductor), los transistores de un solo electrón (basados en la cuantización de la carga electrónica), los dispositivos de electrónica molecular (como los nanotubos de carbono) y los reductos cuánticos (*quantum dots*).

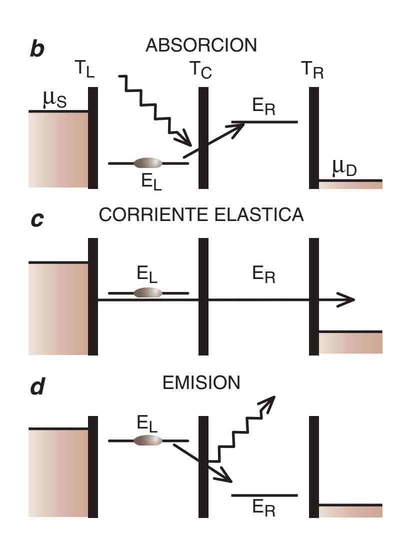
Entendemos por reducto cuántico una pequeña región definida en un material semiconductor de un tamaño aproximado de unos 100 nanómetros. Aunque esta región confinada es muy pequeña, consta de millones de átomos con un número equivalente de electrones. No obstante, la mayoría de los electrones están ligados a los núcleos del material; por tanto, el número de electrones que pueden contribuir a la corriente electrónica varía entre uno y varios cientos. La longitud de onda de De Broglie de estos electrones viene a coincidir con el tamaño del reducto cuántico; así, los electrones ocupan niveles cuánticos discretos, similares a los orbitales atómicos en átomos naturales. En razón de esa analogía los reductos cuánticos se denominan también átomos artificiales.

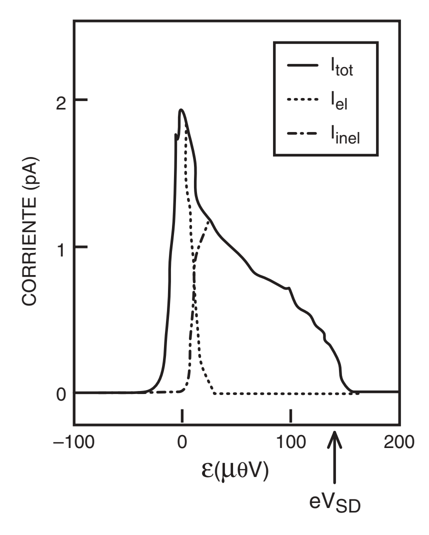
Cuando conectamos dos reductos cuánticos mediante una barrera de efecto túnel creamos una molécula artificial. Atomos y moléculas artificiales difieren de los naturales por una característica fundamental: a través de los primeros podemos hacer pasar corrientes y voltajes. Esta fascinante propiedad podría originar, a la larga, nanotécnicas con gran capacidad de integración, dispositivos ultrarrápidos (las frecuencias típicas de un reducto cuántico están en la escala de los gigahertz), transistores de un solo electrón o computadoras cuánticas.

Gran parte de las propiedades cuánticas de los sistemas mencionados requieren que exista coherencia en la función de onda electrónica, que el electrón se comporte como una



1. Imagen de microscopía de barrido de la molécula artificial y esquema explicativo. En el esquema, L y R denotan los dos reductos cuánticos acoplados. Fuente y sumidero son los contactos entre los que aplicamos un voltaje del orden de microvolt y medimos la corriente electrónica (del orden de picoampère). El tamaño total de la molécula artificial es de 380 nanómetros. Aplicando distintos voltajes en los puntos G_L, G_C y G_R creamos barreras túnel para los electrones (denominadas T_L, T_C y T_R en las figuras 2b, 2c y 2d de la página siguiente) mientras que aplicados en las regiones L y R formas dos átomos artificiales con niveles energéticos cuantizados (E_L y E_R en las figuras 2b, 2c y 2d). Finalmente, un voltaje aplicado entre los contactos del dispositivo (fuente y sumidero en el esquema) permite medir corriente electrónica





2. Posibles procesos de corriente túnel resonante en una molécula artificial. En las figuras 2b, c y d indicamos los tres tipos de procesos que pueden dar lugar a corriente electrónica. El caso 2c (corriente elástica) corresponde al efecto túnel resonante (los dos niveles energéticos E_L y E_R están alineados), mientras que los casos 2b y 2d (corriente inelástica) corresponden a niveles no alineados. En el caso 2b sólo es posible medir corriente si el electrón en el nivel E_L absorbe un fonón y gana energía suficiente para pasar al nivel E_R, mientras que en el caso 2d sólo es posible si el electrón pierde energía emitiendo un fonón. A temperaturas próximas al cero absoluto (–273 ºC) el único proceso posible es la emisión espontánea al vacío cuántico (debido a que el vacío sólo puede absorber energía pero no emitirla). La medida de la corriente electrónica a temperaturas muy bajas en función de la separación entre los niveles ($\varepsilon = E_L - E_R$) es, por tanto, una medida directa del espectro de emisión espontánea, fluctuaciones del vacío, de los bosones (en este caso concreto fonones) que forman el entorno de la molécula artificial. La figura 2e muestra una curva de corriente tomada a una temperatura de 23 grados milikelvin

onda. El tiempo de coherencia electrónico está limitado por el acoplo de los electrones a los bosones de su entorno. Entre estas partículas regidas por la estadística cuántica de Bose-Einstein se encuentran los fotones o los fonones, vibraciones de los átomos del sólido.

A muy bajas temperaturas, del orden de pocos milikelvin, la coherencia en la función de onda electrónica está limitada por el acoplo a las fluctuaciones del vacío de los bosones. La teoría cuántica permite que ese vacío o estado sin partículas fluctúe. En esa configuración, el número de bosones es estadísticamente cero en promedio, pero hay situaciones particulares donde los electrones interactúan con los bosones. Fruto de esa interacción, y habida cuenta de que el vacío cuántico puede absorber energía, los electrones pueden emitir un bosón, modificando sus propiedades de coherencia.

La emisión espontánea, al vacío, de fonones en una molécula artificial ha sido medida por primera vez en un experimento dirigido por Leo Kouwenhoven y ejecutado por el grupo de transporte cuántico de la Universidad de Delft en Holanda y cuyos resultados han sido publicados en la revista *Science*.

Mediante la aplicación de distintos voltajes en la molécula artificial es posible modificar los parámetros que determinan las propiedades cuánticas de ésta: la probabilidad de efecto túnel a través de las barreras, el número de electrones confinados en los reductos cuánticos o la separación entre los niveles energéticos de los átomos artificiales. En concreto, una medida de la corriente electrónica como función de la separación entre los niveles energéticos es una medida de la probabilidad que tiene un electrón de emitir o absorber un fonón. Cuando el dispositivo se enfría hasta alcanzar temperaturas de pocos grados milikelvin, la corriente que medimos es debida, exclusivamente, al acoplo del electrón con las fluctuaciones del vacío cuántico de fonones.

Este experimento demuestra la importancia de las fluctuaciones del vacío en el entorno de átomos y moléculas artificiales a muy bajas temperaturas. Es imprescindible entender los mecanismos básicos que regulan las características cuánticas en estos sistemas y lograr un mejor control de los procesos que limitan sus propiedades para conseguir que los dispositivos cuánticos den lugar a la revolución técnica que en su día siguió al invento del transistor.

RAMÓN AGUADO
Grupo de Transporte Cuántico,
Universidad de Delft, Holanda

Innovación quirúrgica

El bisturí eléctrico

¿Cómo cohibir una hemorragia? ¿Cómo eliminar pólipos o tumores sin producir una hemorragia en el seno de la herida? Los “cirujanos-barberos”, para detener una hemorragia, aplicaban cauterios sobre las heridas. Consistían en placas metálicas de diversas formas, calentadas al rojo en brasas que se mantenían mediante un fuelle.

El descubrimiento de la pila y del calentamiento de los metales recorridos por una corriente eléctrica hizo surgir en la mente de algunos médicos la idea de aprovechar la corriente eléctrica para cauterizar las heridas. Cuando Eugène de Séré, nacido en 1828, comenzó sus estudios de medicina, el nivel de la enseñanza era excelente. La mentalidad anatomoclínica estaba en su apogeo y la enseñanza de las ciencias básicas, complementarias de la medicina, como la física, la química y la historia natural sirvió de fermento para la invención y puesta a punto de un instrumento que iba a conocer un éxito notable: el bisturí galvano-cáustico.

De Séré se doctoró en 1853. Alistado como médico militar, en 1854 embarcó rumbo a la guerra de Crimea, en donde el cólera y el escorbuto hacían estragos. Allí el cuerpo de sanidad perdió al noventa por ciento de sus efectivos. A la vuelta recibió la medalla militar, pero pronto se vio envuelto en la corta pero terrible Campaña de Italia, que puso de relieve la falta de adaptación de los servicios sanitarios a combates mortíferos. Las ambulancias y los hospitales de campaña se encontraban desbordados, el personal médico era insuficiente y no había más que un

médico por cada mil hombres. Amén de la incapacidad del servicio de intendencia. En el puerto de Génova se amontonaban 1800 paquetes, 1900 kilos de material de curas, 3000 lotes completos de hospitales, 2 arcones de ambulancia y 25 cantinas de campaña, que fueron devueltos a Francia sin abrir.

A su regreso, de Séré fue destinado al hospital militar de Vincennes; muy pronto se unió en Antibes a la Legión francorromana, que formaba parte de las tropas pontificias. Más tarde se trasladó a Beauvais, en donde prosiguió sus "experiencias con baños eléctricos", que habían comenzado en 1858 y tenían por objeto la aplicación de "la electricidad a la terapéutica médica". A partir de los trabajos de Luigi Galvani y Alexandro Volta, algunos médicos se interesaron por las posibilidades terapéuticas de la corriente suministrada por las pilas. Unos querían utilizarla como tratamiento de diversas enfermedades y otros se interesaron en el calenta-

Biodiversidad

en una cuenca fluvial

Los ríos son ecosistemas muy complejos y dinámicos. También los más amenazados en muchos sitios.

El estudio integrado de un ecosistema fluvial requiere tomar en consideración numerosos parámetros, fisícoquímicos unos y biológicos otros; han de incluirse también las características hidráulicas e hidrogeológicas, así como las de la ribera o ecosistema ripario.

Un equipo de la Universidad de Barcelona, CREAF e Instituto Botánico de Barcelona, con la ayuda del Consorcio de la Cuenca del Besós, escogimos el río homónimo, que desemboca cerca de Barcelona, para nuestra investigación. Su cuenca, muy heterogénea, abarca 1038 kilómetros cuadrados. La dividimos en cuatro ecodistritos, caracterizados por diferentes factores (geología, relieve, orientación, aspectos climáticos, aspectos biogeográficos y usos del territorio), para facilitar el trabajo y descubrir posibles regularidades que permitan un diagnóstico más preciso. En el estudio analizamos 314 kilómetros de tramos de río y se muestreó un centenar largo de enclaves. El análisis de determinados factores abióticos y de las especies que conforman la diversidad habría de reflejar la calidad de estos ecosistemas.

Nos basamos en seis indicadores que revelaban la calidad química y biológica del agua y de la ribera: salinidad, eutrofia, macroinvertebrados, peces vegetación y aves. Los dos últimos, el sistema de ribera. Por mor de comparación, normalizamos los índices en cinco niveles cualitativos, que iban de natural a pésimo.

En el ecodistrito 1, que se superpone al parque natural del Montseny, la biodiversidad es allí óptima, mientras que es muy baja en el ecodistrito 3, correspondiente a los tramos medios-bajos de la mayoría de los ríos y rieras, que aquí sufren además mayor presión humana.

El curso fluvial se halla menos degradado que la ribera. Entre otras razones, eso se debe al carácter menos fluctuante de la orilla, con un tiempo de recuperación muy largo. Curso del agua y ribera son dos compartimentos con una dinámica propia. Habrá, pues, que atender a una y otra en la gestión integrada de la cuenca, en particular si se quiere que la red de ríos y rieras actúen como corredores biológicos. Por lo que a conservación del ecosistema fluvial se refiere, hay que atender al mantenimiento de un caudal mínimo, la reutilización de las aguas, el tamponamiento de las avenidas, control y regulación de las obras de fábrica que afecten el lecho del río, control y calidad de los afluentes de las depuradoras, disminución de la concentración de nutrientes, control del agua de lluvia y control y mantenimiento del cauce. Si miramos la gestión de la ribera, se recomienda la conservación de las áreas en buen estado, control y erradicación, si conviene, de los pastos, regulación de los cultivos y explotaciones forestales, así como restauración en mosaico con especies autóctonas.

FERNANDO CARCELLER
Universidad de Barcelona
ANGEL ROMO
Instituto Botánico de Barcelona

Biodiversidad en la cuenca del Besós. Para las algas se indica el número de familias, para los macroinvertebrados el núme de taxones por debajo de familia. Para el resto de los grupos se indica el número de especies. Los datos de libélulas se refiere sólo a localidades de los ecodistritos 1 y 2.

	Superficie (km^2)	Tramos de río (km)	Algas	Macro-invertebrados	Peces	Libélulas	Anfibios	Reptiles	Aves	Plantas
Ecodistrito 1	140	63	194	127	4		11	2	54	105
Ecodistrito 2	300	90	95	150	5		9	4	42	173
Ecodistrito 3	495	130	85	72	2		9	3	72	202
Ecodistrito 4	103	31	114	63			9	3	43	126
Total cuenca	**1038**	**314**	**213**	**267**	**8**	**(29)**	**11**	**5**	**85**	**333**

miento de los metales recorridos por una corriente eléctrica.

A comienzos del siglo XIX, Anthelme Récamier, en el Hôtel-Dieu de París, intentó eliminar un tumor uterino mediante el calor. En 1843, en Viena, Moritz Heider cauterizó la pulpa dental con un hilo de platino calentado al rojo mediante una corriente eléctrica. En 1846, Crusell de Wiborgsk se aprestó a cortar tejidos biológicos con un hilo de platino calentado mediante una corriente. En 1849, Charles Sédillot se lanzó en Estrasburgo a la aventura de operar fístulas anales. En 1854, Albrecht Theodor Middeldorf utilizó un hilo de platino para eliminar un tumor nasal. Este uso de hilos de platino calentados mediante electricidad se extendió por toda Europa, pero la pila de Grove utilizada para suministrar la corriente era muy voluminosa y cara y la cantidad de platino necesaria, casi inalcanzable.

Middeldorf llegó por entonces a París, amparado por Paul Broca, que seguía con interés las aplicaciones de la electricidad. A él y a Eugène de Séré se debe el refinamiento de un dispositivo, ahora ya práctico. Defendieron el empleo de la pila del ingeniero Grenet, más económica y manejable. El cuchillo de Eugène de Séré conquistó a Auguste Nélaton, cirujano del Emperador. Tras ensayarlo con un cadáver, lo probó con un enfermo que padecía un tumor recidivante en el brazo. La resección de la tumoración era perfecta, pero a temperatura elevada, el cuchillo era muy cortante y de Séré temía el riesgo de hemorragia. Sus temores eran fundados: ideó un dispositivo que le permitía ajustar la temperatura y, al mismo tiempo, transformar el bisturí cortante en un cauterio.

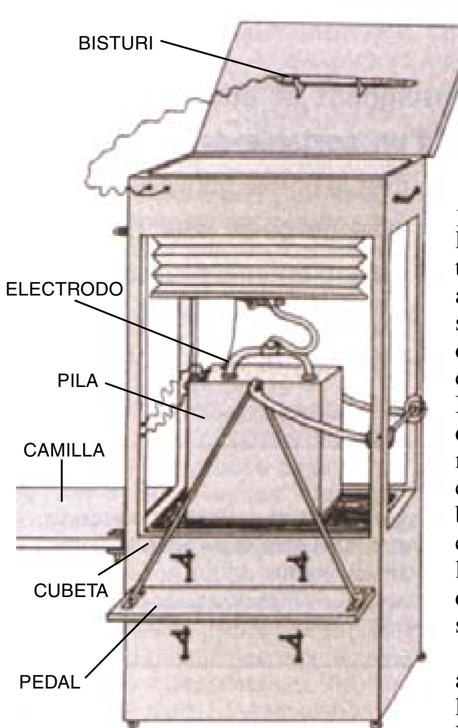
Gracias a tres reglajes independientes, la pila de Grenet permite obtener una corriente de intensidad variable. Por un lado, la pila lleva un fuelle que inyecta aire en el líquido de la pila. Cuando se acciona el fuelle, el contenido de la cuba, 50 litros, se homogeneiza y la intensidad de la corriente producida aumenta. Por otra parte, la corriente varía según la altura del zinc sumergido en el líquido: cuando se elevan las placas de zinc, disminuye la intensidad de la corriente. De Séré ideó un pedal que permitía en el transcurso de la operación regular la intensidad con el pie. Por último, en el mismo cuchillo se colocó un reostato que afinaba todavía más la regulación de la temperatura, es decir, del efecto buscado (sección o coagulación).

Cauterio y bisturí

El 23 de marzo de 1863, de Séré presentó su cuchillo galvano-cáustico en la Academia de Ciencias, mientras Paul Broca lo hacía ante la Sociedad imperial de cirugía en febrero de 1866. La principal innovación de este instrumento era su temperatura regulable entre 600 y 1500 ºC. ¿En qué residía el interés por hacer variar la temperatura del cuchillo? El corte del cuchillo de platino cambia en función de la temperatura: "espuma" o "esponja" de platino a baja temperatura, pasa a ser muy afilado y de un blanco resplandeciente a alta temperatura (funde a 1750 ºC). No obstante, los cirujanos sabían ya que la temperatura recomendada para cauterizar las heridas era del orden de 600 ºC: a esta temperatura, el cuchillo de Eugène de Séré servía de cauterio. Hacia los 1500 ºC el cuchillo no cauterizaba, pero se convertía en un bisturí afiladísimo.

Para seccionar los pólipos o los tumores difíciles de abordar con el cuchillo, de Séré reemplazó éste por una "asa cortante", una especie de lazo cuya temperatura, como la del bisturí, podía variar entre 600 y 1500 ºC. Cuando el hilo era grueso o cuando se trenzaban varias hebras, se favorecía el efecto coagulador; cuando la hebra era fina, predominaba el efecto cortante. Sin embargo, el hilo de platino se rompe con facilidad cuando está muy caliente.

El cuchillo de de Séré se ganó presto el favor de los cirujanos. Pero sus ojos no vieron la consagración de su instrumento. Francia había declarado la guerra a Prusia el 18 de julio de 1870. La enfermería donde de Séré ejercía se encontraba cerca de Mouzon, en el punto de mira del cañón de las tropas prusianas. Durante un ataque, murió de un disparo de bala en el pecho, mientras atendía a los heridos de la enfermería. El ejército francés, al mando de Napoleón III y Mac Mahon, cercado en la hondonada de Sedan, se vio obligado a rendirse el 2 de setiembre de 1870.



Eugène de Séré alimentaba el bisturí (arriba), *con una pila de Grenet colocada en una cubeta. Por medio de un pedal, el cirujano subía más o menos los electrodos con el fin de ajustar la corriente a la temperatura deseada para el bisturí. En uno de los lados, unos ganchos servían para sujetar una camilla: de esta manera, podía operarse a un herido grave sin necesidad de desplazarlo*

De la pila al láser

El principio de la temperatura variable se conservó en los bisturíes que siguieron al de de Séré y la alimentación eléctrica se mejoró notablemente. Esta mejora se debió primero a las investigaciones sobre las corrientes de alta frecuencia efectuadas por Nikolas Tesla y, después, a los estudios de Arsène d'Arsonval sobre las propiedades biológicas de dichas corrientes, controladas por completo a partir de entonces. W. Bovie introdujo las lámparas TSF, que proporcionaban una intensidad máxima inferior, para así intervenir en tejidos de menor grosor. Con el bisturí de de Séré, a baja temperatura, el efecto biológico predominante es la coagulación de proteínas, mientras que a temperatura elevada los tejidos se vaporizan.

La obtención de una corriente de alta frecuencia estable y el control de la penetración del bisturí constituyen las dos mejoras más notables aportadas por el bisturí de de Séré. Hoy en día, los cirujanos que trabajan con bisturíes láser se enfrentan a las mismas dificultades que los cirujanos del siglo XIX que descubrieron las aplicaciones médicas de la electricidad: controlar la profundidad de la incisión y el calentamiento de los tejidos.

ALAIN SÉGAL
JEAN-JACQUES FERRANDIS

Texto y fotos: Albert Calbet y Maximino Delgado

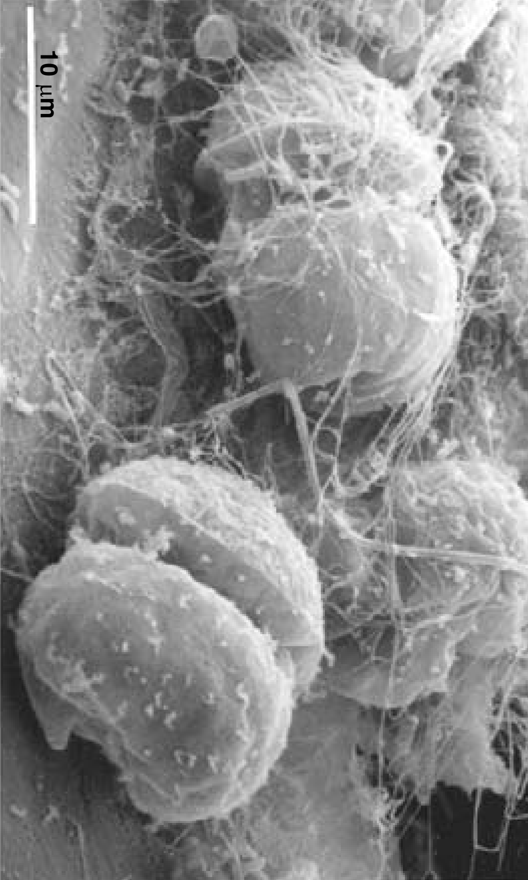
Mareas rojas: El cazador cazado

En una cadena trófica marina típica los productores primarios (microalgas planctónicas) son consumidos por el zooplancton, que a su vez será presa de larvas de peces; las cuales, alcanzado el tamaño adecuado, entrarán a formar parte de nuestra dieta. De ese modo, parte de la materia y la energía acumuladas por las algas se van transfiriendo hasta llegar a consumidores de alto orden, el hombre por ejemplo. Hay ocasiones en que esa secuencia o cadena se trunca, cuando no sucede también que algunos de sus componentes abandonan el papel pasivo de presas y se convierten en trampas mortales para sus depredadores. Así ocurre con ciertas algas microscópicas que poseen toxinas capaces de matar a sus consumidores inmediatos y, a través de la cadena trófica, pueden llegar incluso a causar serias intoxicaciones a humanos, si no la muerte.

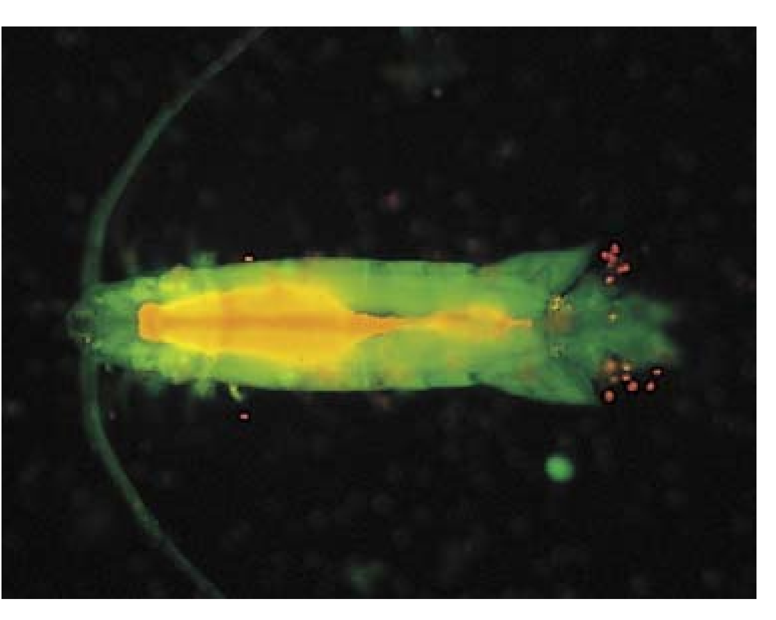
En la actualidad, gracias a programas obligatorios de vigilancia de la calidad de las aguas costeras, las intoxicaciones humanas por consumo de marisco o peces contaminados se han reducido. No obstante, el efecto de proliferaciones de microalgas nocivas (mareas rojas o purgas de mar) sobre el ecosistema marino es importante. Estudios de laboratorio demuestran que algunos de los integrantes del zooplancton oponen cierta resistencia ante un aumento de algas tóxicas en el medio, ya sea con su comportamiento (evitando el consumo) o con su metabolismo (resistencia a las toxinas). Sin embargo, en otras ocasiones un consumo excesivo de microalgas tóxicas significa la muerte para el organismo del zooplancton y para cualquier otro que ingiera a éste.

En resumen, las interacciones entre microalgas tóxicas y el zooplancton reveladas durante episodios esporádicos en forma de mareas rojas manifiestan, pues, tipologías muy diversas y complejas, lo que, a la postre, impide extraer generalizaciones sobre el funcionamiento de los ecosistemas marinos.





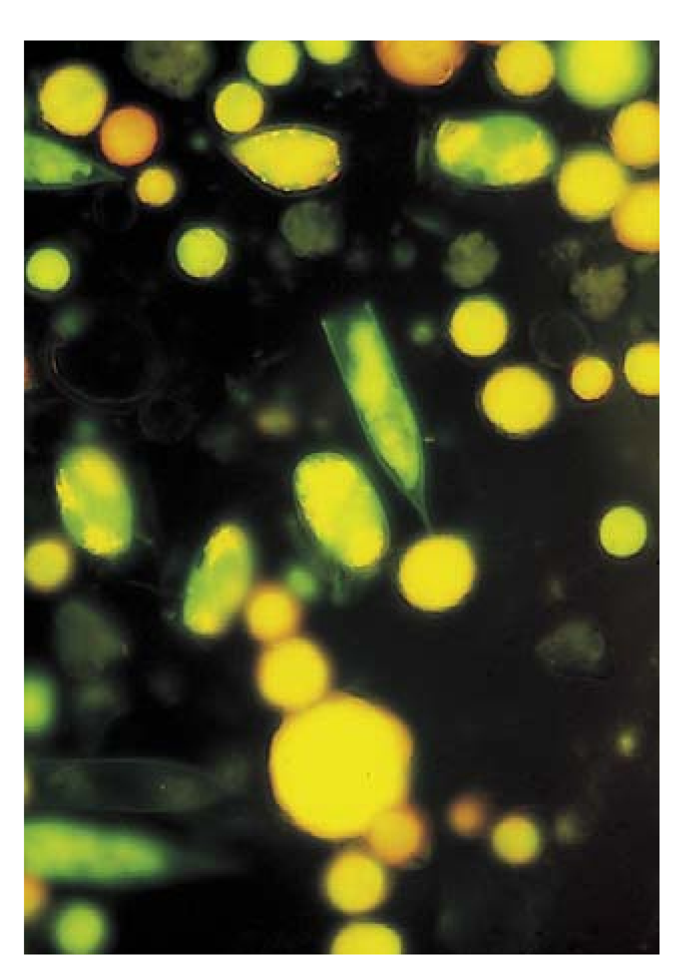
1. Dos imágenes de microscopía electrónica de barrido que nos muestran la dinoflagelada tóxica Gyrodinium corsicum *adherida al segmento genital de una hembra del copépodo* Acartia grani.



2. Hembra del copépodo Acartia grani. *En naranja, el tracto digestivo repleto del alga* Rhodomonas baltica*. La coloración especial de la imagen se debe a la técnica empleada: microscopía óptica de epifluorescencia*



3. Penilia avirostris. *Esta especie de cladócero marino presenta gran importancia en el zooplancton del litoral mediterráneo durante el verano*



4. Comunidad natural de plancton obtenida con microscopía de epifluorescencia en la que se aprecian varias dinoflageladas tóxicas de la especie Dinophysis sacculus



5. Ejemplar de la dinoflagelada tóxica Dinophysis sacculus



La Tierra, una bola de nieve

Hace cientos de millones de años, los hielos cubrían el planeta; con la ola de calor que siguió, debida al efecto de invernadero, aparecieron los animales

Paul E. Hoffman y Daniel P. Schrag

Nuestros antepasados lo tuvieron difícil. Los tigres de dientes de sable y los mamuts de espesa lana constituían preocupación diaria, pero la dureza del clima era una agotadora batalla sin tregua. En el curso del último millón de años, hubieron de hacer frente a una glaciación tras otra. En el punto álgido del postrer episodio glacial, hace 20.000 años, glaciares de más de dos kilómetros de espesor recubrieron gran parte de Norteamérica y Europa (hasta la latitud de Burdeos).

Por dramático que parezca, esas condiciones climáticas extremas palidecen en comparación con los catastróficos sucesos que algunos de nuestros antepasados microscópicos soportaron hace unos 600 millones de años. Inmediatamente antes de la aparición de los organismos pluricelulares, en el Neoproterozoico, dominó una edad del hielo con tal intensidad, que se congelaron hasta los trópicos.

La Tierra atravesaría el espacio en forma de bola de nieve cósmica, durante diez millones de años o más. El calor que se desprendería del núcleo fundido impediría que los océanos se congelaran hasta el fondo, pero los hielos alcanzarían un espesor de un kilómetro en el gélido ambiente a –50 grados Celsius. Todos los primitivos organismos del planeta, excepto una pequeña fracción, morirían. Aparte del rechinar del roce de los glaciares y del gemido de los hielos marinos, el único revuelo provendría de un intento de los volcanes por forzar sus ardientes cabezas por encima de la frígida superficie. Aunque pareciera que el planeta nunca fuera a despertar de su criogénico sueño, los volcanes lentamente fabricaron una manera de escapar del frío: el dióxido de carbono.

Con los ciclos químicos que consumen dióxido de carbono suspendidos por la helada, el gas se acumularía hasta concentraciones insólitas. Ahora bien, el dióxido de carbono, uno de los gases de efecto invernadero, retiene el calor, calienta el planeta y promueve la fusión de los hielos. Aunque en el deshielo se tarda escasos centenares de años, aparece un nuevo problema, el representado por un brutal efecto de invernadero. Los organismos que sobrevivieran al helero debían ahora soportar un horno.





1. TORRES DE HIELO, igual que las del glaciar argentino de Perito Moreno, cubrieron los continentes de la Tierra. Se ha obtenido información de ese ayer gélido en las capas de roca expuestas, como las de estas colinas cerca de la costa noroeste de Namibia (*encuadre*).

Por improbable que parezca, observamos claras indicaciones de que semejante alteración climática, la más extrema que pudiera imaginarse para el planeta, ocurrió al menos cuatro veces, hace entre 750 millones de años y 580 millones de años. Creíase que el clima terrestre nunca había experimentado esos cambios drásticos, reservados para Venus u otros planetas. Mas, a principios de los años sesenta, empezaron a acumularse indicios de un duro pasado de la Tierra; en el curso de los últimos ocho años, nuestro equipo ha recogido numerosas observaciones que nos han ayudado a tejer una historia del clima de manifiesto interés para geólogos, biólogos y meteorólogos.

La memoria del clima que reinaba en el Neoproterozoico se conserva en estratos rocosos. Durante decenios, muchas de esas pistas parecían contradictorias. La primera paradoja llegaba con la presencia de restos glaciales casi al nivel del mar en los trópicos. Hoy, los únicos glaciares próximos al ecuador se encuentran a 5000 metros sobre el nivel del mar o más arriba; en lo más crudo del último período glacial no bajaron de los 4000 metros. Entremezclados con los restos glaciales, hay depósitos de rocas ricas en hierro; estas rarezas sólo pudieron haberse formado si los océanos y la atmósfera neoproterozoicos hubieran estado desprovistos de oxígeno; mas para esa época la atmósfera ya había evolucionado hasta adquirir la mezcla de gases que contiene ahora. Para acabar de confundir las cosas, tras la retirada de los glaciares parecen haberse acumulado rocas de las que se sabe que sólo se forman en aguas calientes. Pero si la Tierra había llegado a estar cubierta de hielo, ¿cómo se calentó de nuevo? Además, la composición isotópica del carbono en las rocas apuntaba a una prolongada caída de la productividad biológica. ¿Qué pudo, pues, haber causado esa espectacular pérdida de vida?

Son viejas cuestiones que se iluminan si las sometemos a un nuevo foco, si las consideramos sucesos clave en el desarrollo de la historia de una “Tierra en bola de nieve”. La teoría ha recibido cauteloso apoyo en la comunidad científica desde que publicamos nuestro modelo en 1998. Si nos asiste la razón, nuestra idea explicaría los misterios del clima neoproterozoico y dejaría en entredicho hipótesis arraigadas sobre los límites del cambio global. Estas glaciaciones extremas acontecerían en la víspera de una rápida diversificación de la vida pluricelular, que culminó con la “explosión del Cámbrico”, hace entre 575 y 525 millones de años. Por ironía de las cosas, los largos períodos de aislamiento y condiciones ambientales extremas, en una Tierra en bola de nieve, habrían espoleado las mutaciones genéticas que, a la postre, darían cuenta de semejante irradiación evolutiva.

En búsqueda de indicios sólidos de tales episodios climáticos hemos recorrido el mundo entero. Aunque ahora examinemos rocas neoproterozoicas de Australia, China, oeste de los EE.UU. y las islas árticas de Svalbard, la investigación inicial se retrotrae a 1992, en los acantilados rocosos de la costa de los Esqueletos, en Namibia. En la era neoproterozoica, esta región del sudoeste africano formaba parte de una vasta plataforma continental, en las bajas latitudes meridionales, que se hundía lentamente.

Allí descubrimos prueba de glaciares en las rocas formadas por depósitos de polvo y rocalla, aban-



2. LAS MASAS CONTINENTALES DE LA TIERRA se agrupaban, muy verosímilmente, cerca del ecuador durante las glaciaciones globales que padeció el planeta hace unos 600 millones de años. Aunque los continentes han cambiado de posición desde entonces, restos de la rocalla que quedó tras la fusión de los hielos afloran en docenas de puntos de la actual superficie terrestre, en particular en Namibia (*punto rojo*).

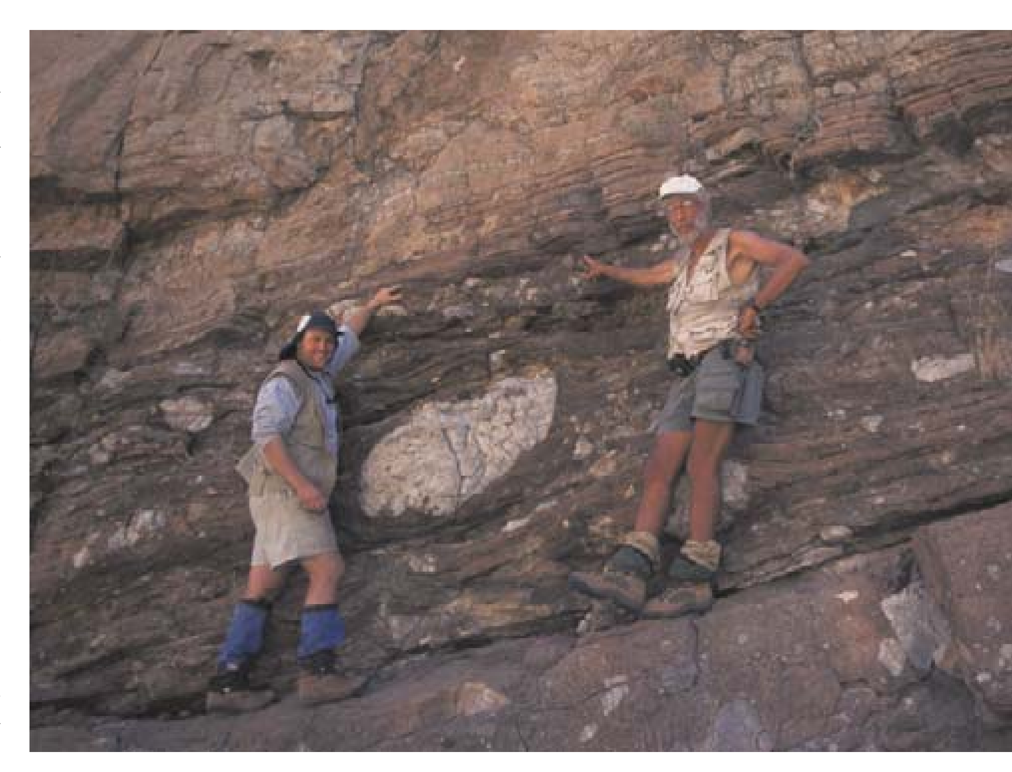
donados por el hielo al fundirse. Las rocas en que predominan los minerales de carbonatos de calcio y magnesio quedan inmediatamente encima de la rocalla de los glaciares; contienen la prueba química del invernadero que siguió al período de extrema glaciación. Tras su entierro de cientos de millones de años, estas rocas afloran y nos revelan una historia que empezó a barruntarse hace 36 años.

En 1964, W. Brian Harland, de la Universidad de Cambridge, enseñó que los depósitos glaciales moteaban los afloramientos de rocas neoproterozoicas a lo largo y ancho de los continentes. A principios de los años sesenta, comenzó a abrirse paso la teoría de la tectónica de placas; describe ésta la partición de la piel rocosa del planeta en fragmentos gigantescos que flotan sobre una masa de rocas más calientes en continua agitación. Basándose en la orientación magnética de granos minerales apresados en las rocas glaciales, Harland sugería que los continentes se habían reunido en las proximidades del ecuador durante la era neoproterozoica. Antes de que las rocas se solidificaran, los granos de marras se alinearon con el campo magnético terrestre; en razón de su posición próxima al ecuador aparecían ligeramente inclinados respecto al mismo plano horizontal. (Si se hubieran formado cerca de los polos, su orientación magnética habría sido casi vertical.)

Al observar que los glaciares debieron cubrir los trópicos, Harland avanzó la hipótesis de una Tierra sometida a un gran período glacial neoproterozoico. Aunque algunos de sus colegas se mostraron escépticos sobre la fiabilidad de los datos magnéticos, otros han corroborado la validez de la idea de Harland. Pero nadie explicaba por qué los glaciares resistieron el calor tropical.

Por la época en que Harland anunció su tesis sobre los glaciares neoproterozoicos, los físicos esbozaban los primeros modelos físico-matemáticos del clima terrestre. Mikhail Budyko, del Observatorio Geofísico de Leningrado, halló una forma de explicar los glaciares tropicales empleando ecuaciones que describían la interacción entre la radiación solar, por un lado, y la superficie terrestre y la atmósfera, por otro, para controlar el clima. Algunas superficies geográficas reflejan más energía solar incidente que otras, magnitud característica cuantificable y conocida como albedo. La nieve blanca refleja la mayor parte de la energía solar y tiene un alto albedo; el agua del mar obscurecida posee un albedo bajo y las superficies continentales presentan valores de albedo intermedios que dependen de los tipos y distribución de la vegetación.

Cuanto mayor es la radiación solar que reflejan los planetas, menor es su temperatura. Con un alto albedo, la nieve y los hielos enfrían la atmósfera y así aseguran su propia existencia. Budyko sabía que este fenómeno, llamado realimentación del albedo de los hielos, contribuye a la expansión de las capas de hielo polares. Pero sus simulaciones climáticas revelaron también que esta realimentación podía descontrolarse. Cuando los glaciares se formaron a latitudes inferiores a los 30 grados al norte y sur del ecuador, aumentó el albedo del planeta, pues la radiación solar directa incidía sobre un área de hielo mayor por grado de latitud. La realimentación se hizo tan intensa en su simulación, que las temperaturas en superficie cayeron a plomo y el planeta entero se congeló.



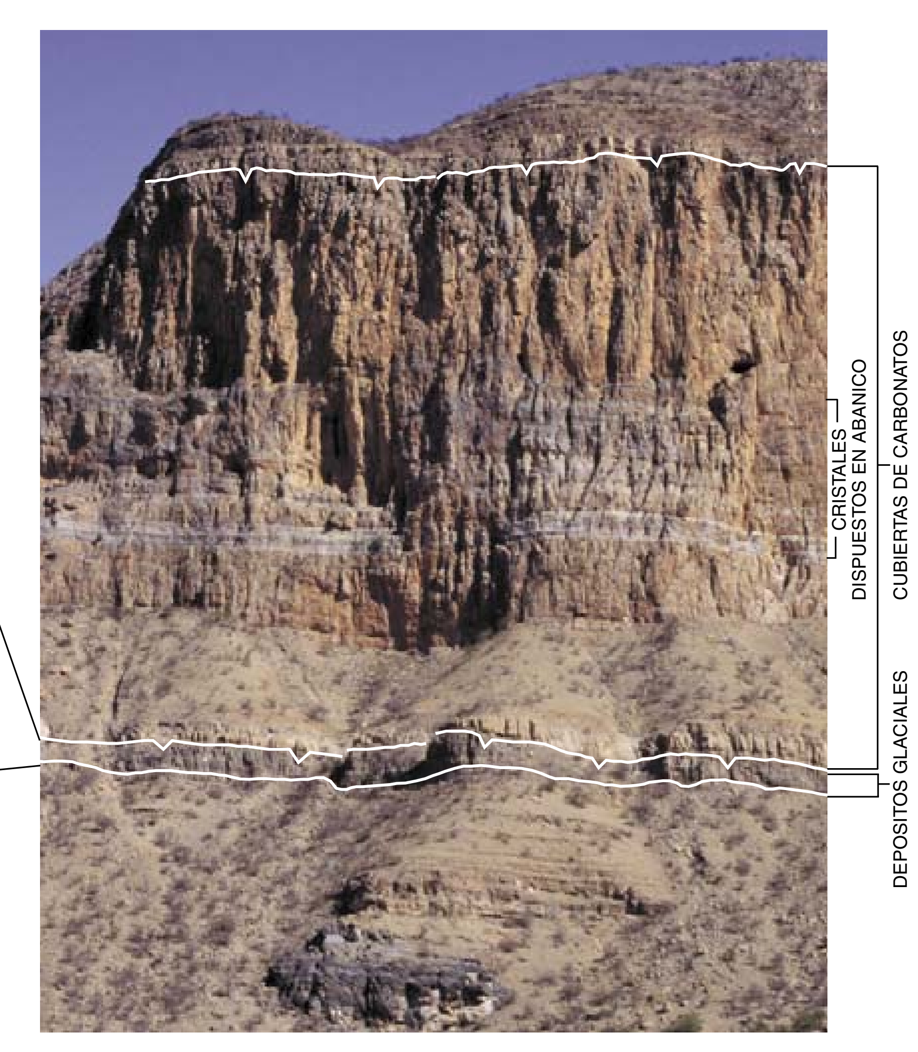
Congelado y frito

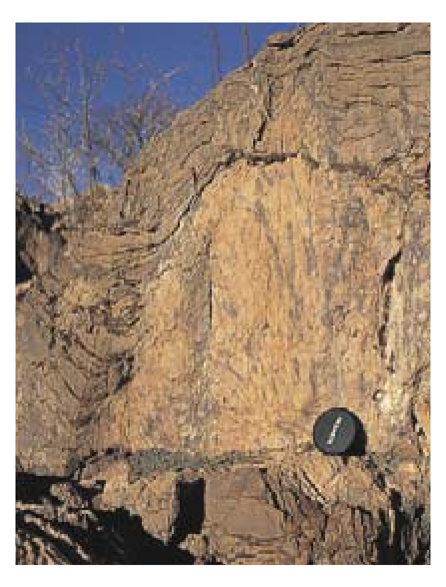
La simulación de Budyko despertó el interés por el modelado climático. Pero ni siquiera él creyó que la Tierra hubiera experimentado una glaciación global. Tendía a admitirse que con tamaña catástrofe se hubiera apagado del todo la vida. Sin embargo, hay algas microscópicas fosilizadas en rocas de hasta mil millones de años de antigüedad; semejantes a las formas modernas, nos hablan de una continuidad de la vida. Además, una vez que la Tierra hubiera entrado en una glaciación profunda, el albedo de su gélida cubierta habría llevado las temperaturas en superficie a valores tan bajos, que se hubiera extinguido todo aliento de vida; y si tal glaciación hubiera tenido lugar, adujeron Budyko y otros, habría sido permanente.

A finales de los años setenta empezaron a desvanecerse las objeciones con el descubrimiento de notables comunidades de organismos que vivieron bajo condiciones reputadas hasta entonces insoportables. En los manantiales calientes del fondo de los océanos medran microorganismos que no extraen su energía de la luz solar, sino de substancias químicas. Ahora bien, la actividad volcánica que alimenta esos manantiales habría proseguido sin amainar en una Tierra en bola de nieve. Las perspectivas de supervivencia parecen todavía mejores para los organismos psicrofílicos, o amantes del frío, de la clase que hoy vive en los valles, intensamente fríos y secos, de las montañas de la Antártida oriental. Las cianobacterias y ciertas clases de algas colonizan la nieve, las rocas porosas y las superficies de partículas de polvo encerradas en los hielos flotantes.

La clave del segundo problema —invertir la glaciación global— la porta el dióxido de carbono. En el período brevísimo de una vida humana, la cantidad atmosférica de dióxido de carbono puede cambiar ya que las plantas consumen el gas para la fotosíntesis y los animales lo expelen durante la respiración. Además, la combustión de carburantes fósiles y otras actividades humanas han sobrecargado el aire con dióxido de carbono desde el comienzo de la revolución industrial en la segunda mitad del siglo XVIII. Pero en el intervalo temporal de la existencia de la Tierra, esas fuentes y sumideros de carbono se tornan insignificantes en comparación con los procesos geológicos.

El dióxido de carbono es uno de los varios gases emitidos por los volcanes. Esa aportación indefinida de carbono suele quedar compensada con la erosión de rocas silíceas. En el transcurso de la descomposición química de estas rocas, el dióxido de carbono se transforma en bicarbonato, que es arrastrado por las aguas a los océanos. Allí, el bicarbonato se combina con los iones calcio y magnesio para producir sedimentos ingentes de





3. LOS ACANTILADOS ROCOSOS que recortan la Costa de los Esqueletos de Namibia (*izquierda*) han proporcionado algunas de las mejores pruebas a favor de la hipótesis de la Tierra en bola de nieve. D. Schrag (*primero a la izquierda*) y P. Hoffman señalan una capa rocosa, signo del fin repentino de un episodio de glaciación extrema, acontecido hace unos 700 millones de años. La notable incrustación, de color claro, entre ellos, viajó dentro de un témpano y cayó al fangoso fondo del mar cuando el hielo se fundió. Las capas de carbonato puro apiladas sobre los depósitos glaciales precipitaron en los cálidos y someros mares del invernadero ulterior. Tales depósitos carbonatados constituyen las únicas rocas del Neoproterozoico que presentan grandes despliegues de cristales en abanico, que acompañan a la rápida acumulación de carbonato (*arriba*).

carbonatos, que lo almacenan en gran proporción de carbono.

En 1992, Joseph L. Kirschvink, del Instituto de Tecnología de California, mostró que, durante una glaciación global, proseguiría el corrimiento de las placas tectónicas, para formar volcanes y aprovisionar la atmósfera de dióxido de carbono. Al mismo tiempo, el agua líquida necesaria para erosionar las rocas y encerrar el carbono quedaría aprisionada en forma de hielo. Sin otro lugar adonde ir, el dióxido de carbono se acumularía en la atmósfera hasta niveles increíbles, suficientes, en opinión de Kirschvink, para calentar el planeta y poner fin a la glaciación global.

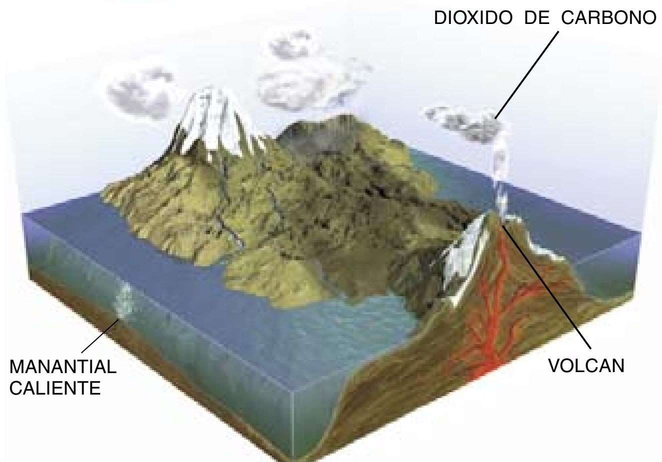
Kirschvink había defendido la idea de una glaciación global en el Neoproterozoico apoyado, en buena medida, en los misteriosos depósitos de hierro que se habían hallado mezclados con la rocalla glacial. Estos raros depósitos aparecieron mucho antes en la historia de la Tierra, en el momento en que los océanos (y la atmósfera) contenían muy poco oxígeno y el hierro podía disolverse sin dificultad. (El hierro es virtualmente insoluble en presencia de oxígeno.) Si la Tierra había permanecido cubierta de hielo durante millones de años, razonaba Kirschvink, los océanos se hubieran visto privados de oxígeno, de modo que el hierro disuelto, expelido por los manantiales cálidos del fondo de los mares, podría acumularse en el agua. Luego, en cuanto el dióxido de carbono indujera el efecto de invernadero, empezarían a fundirse los hielos; el oxígeno se mezclaría de nuevo con las aguas oceánicas y obligaría al hierro a precipitar junto con la rocalla que en tiempos había sido transportada por los hielos marinos y glaciares.

Partiendo de este supuesto del efecto de invernadero, Kenneth Caldeira, del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, y James F. Kasting, de la Universidad estatal de Pennsylvania, estimaron en 1992 que la superación de la glaciación global requeriría unas 350 veces la concentración actual de dióxido de carbono. Suponiendo que los volcanes del Neoproterozoico emitieran una cuantía de gases idéntica a la arrojada hoy, el planeta hubiera continuado encerrado en los hielos durante decenas de millones de años, antes de que se pudiera acumular suficiente dióxido de carbono para comenzar a fundir el mar helado. Esa glaciación no sólo habría sido

TRÁNSITO DE UNA TIERRA HELADA A UNA TIERRA



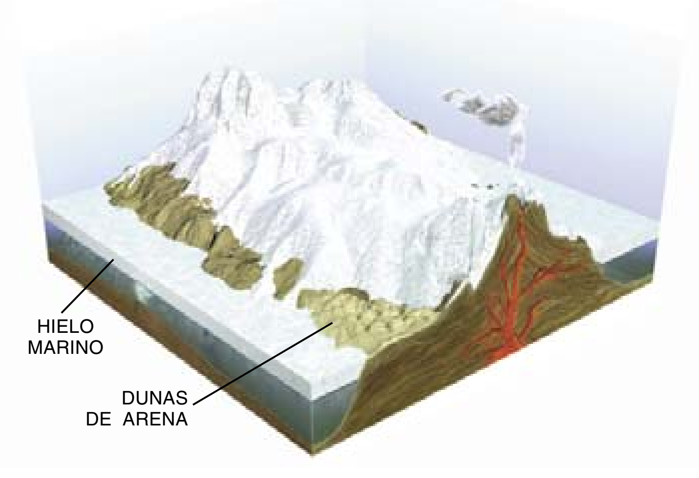
Fase 1
Prólogo de Tierra en bola de nieve



Hace 770 millones de años, los continentes resultantes de la disgregación del supercontinente de Rodinia convergieron cerca del ecuador. Las fuertes precipitaciones arrastran una mayor cantidad de dióxido de carbono (puntal del efecto de invernadero) y erosionan más rápidamente las rocas continentales. En consecuencia, baja la temperatura global y se forman en los océanos polares enormes extensiones de hielo. La albura de éste refleja mayor radiación solar que el agua del mar, más oscura, provocando una caída ulterior de la temperatura. Este ciclo de realimentación desencadena un enfriamiento sin fin que termina por envolver de hielo el planeta, en el plazo de un milenio.



Fase 2
Epoca álgida de la Tierra en bola de nieve



Las temperaturas globales medias caen hasta —50º Celsius, tras haber comenzado la glaciación. Los océanos se cubren de una capa de hielo de más de un kilómetro de espesor; sólo el calor que emana del interior de la Tierra sirve de freno. La mayoría de los microorganismos marinos mueren, salvo los que se arraciman en torno a los manantiales termales oceánicos. El aire frío y seco detiene el crecimiento de los glaciares terrestres, creando vastos desiertos de arena arrastrada por el viento. Sin lluvia, el dióxido de carbono emitido por los volcanes no se detrae de la atmósfera. Con su concentración en aumento, el planeta se calienta y los hielos marinos pierden lentamente espesor.

la más cruda, sino también la más prolongada.

Indicios de carbonato

Kirschvink no previó la aparición de dos líneas de indicios que respaldarían su hipótesis de la Tierra en bola de nieve. En primer lugar, los depósitos glaciales del Neoproterozoico se manifiestan casi siempre recubiertos de un horizonte de rocas carbonatadas, formadas en mares cálidos y someros. Si entre el hielo y el agua caliente hubiera mediado un intervalo de millones de años, nadie se habría sorprendido, pero la transición de los depósitos glaciales a esa capa de carbonatos es brusca, sin hiato temporal apreciable entre la época en que los glaciares dejaron caer sus últimas cargas y el momento de formación de los carbonatos. Siempre se volvía a la misma pregunta: ¿a qué obedeció el tránsito vertiginoso de un clima glacial a un clima tropical?

Reflexionando sobre nuestras observaciones de campo en Namibia, caímos en la cuenta de la razón de ese vuelco. El horizonte de rocas carbonatadas resultaba de las extremas condiciones de invernadero, exclusivas de la brusca transición desde una glaciación colosal. A lo largo del tiempo de la glaciación, la atmósfera se habría enriquecido en dióxido de carbono en cuantía suficiente para elevar la temperatura hasta el punto de fusión de los hielos ecuatoriales. Iniciado el proceso de deshielo, el agua del mar, de bajo albedo, sustituye al hielo de alto albedo y la congelación descontrolada se invierte. El efecto de invernadero promovería la subida de la temperatura hasta casi 50 grados Celsius, según cálculos realizados el verano pasado por Raymond T. Pierrehumbert, de la Universidad de Chicago.

El restablecimiento de la evaporación ayuda también a calentar la atmósfera, porque el vapor de agua es un potente gas de invernadero. Además, una atmósfera saturada de humedad impulsaría lluvias torrenciales, que se llevarían parte del dióxido de carbono atmosférico en forma de ácido carbónico; éste erosionaría las rocallas expuestas al retirarse los glaciares. Los productos de la erosión química se acumularían presto en las aguas oceánicas, conduciendo a la precipitación de sedimentos carbonatados, a su acumulación rápida en el fondo marino y a su ulterior

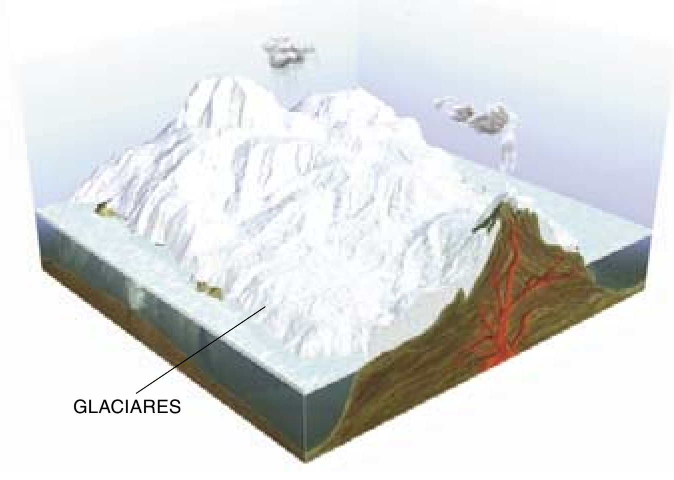
RECALENTADA POR EL EFECTO DE INVERNADERO

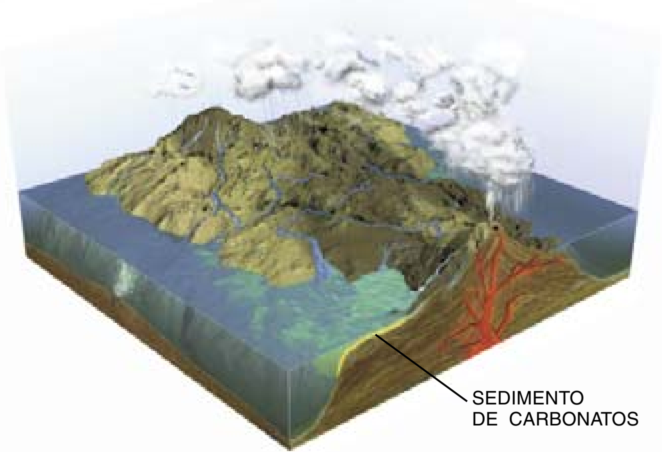


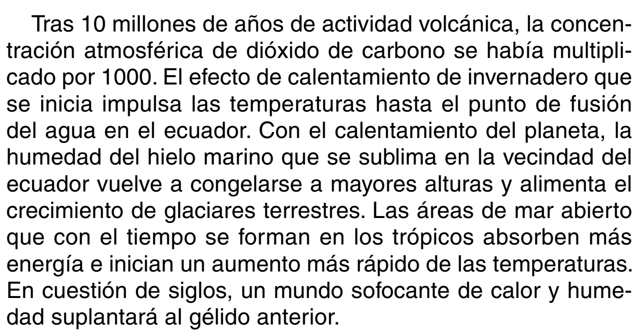
Fase 3
La Tierra en bola de nieve derritiéndose



Fase 4
El consecuente invernadero



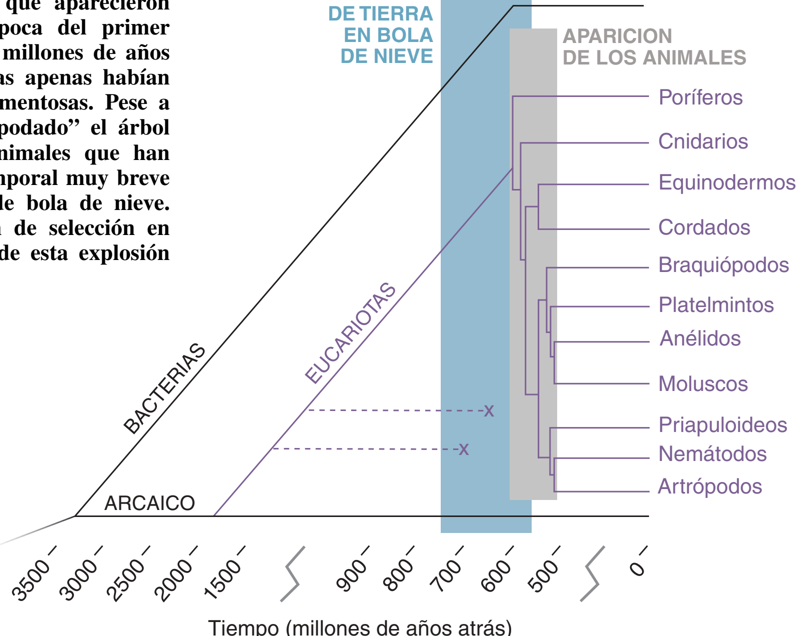




Tras 10 millones de años de actividad volcánica, la concentración atmosférica de dióxido de carbono se había multiplicado por 1000. El efecto de calentamiento de invernadero que se inicia impulsa las temperaturas hasta el punto de fusión del agua en el ecuador. Con el calentamiento del planeta, la humedad del hielo marino que se sublima en la vecindad del ecuador vuelve a congelarse a mayores alturas y alimenta el crecimiento de glaciares terrestres. Las áreas de mar abierto que con el tiempo se forman en los trópicos absorben más energía e inician un aumento más rápido de las temperaturas. En cuestión de siglos, un mundo sofocante de calor y humedad suplantará al gélido anterior.

Con el deshielo de los océanos tropicales, el agua del mar se evapora y, asociada al dióxido de carbono, refuerza el efecto de invernadero. Las temperaturas en superficie superan los 50º Celsius, alimentando un intenso ciclo de evaporación y lluvias. Descargas torrenciales plenas de ácido carbónico erosionan la rocalla que dejan tras sí los glaciares en retirada. En sus crecidas, los ríos arrastran el bicarbonato y otros iones hacia los océanos, donde forman sedimentos carbonatados. Nuevas formas de vida —engendradas por el prolongado aislamiento genético y la presión de selección— bullen por doquier mientras el clima global retorna a la normalidad.

4. TODOS LOS ANIMALES descendieron de eucariotas, células con un núcleo recubierto por una membrana, que aparecieron hace unos 2000 millones de años. Hacia la época del primer episodio de Tierra en bola de nieve, más de mil millones de años después de la aparición de la vida, los eucariotas apenas habían evolucionado: protozoos unicelulares y algas filamentosas. Pese a la dureza extrema del clima, que pudo haber "podado" el árbol eucariota (*líneas de trazos*), los 11 phyla de animales que han habitado la Tierra emergieron en un intervalo temporal muy breve e inmediatamente posterior al último episodio de bola de nieve. El prolongado aislamiento genético y la presión de selección en una Tierra helada podrían ser los responsables de esta explosión de nuevas formas de vida.



transformación en rocas. Las estructuras preservadas en la cubierta de carbonatos de Namibia indican que se acumularon con extrema rapidez, en sólo unos miles de años quizá. Por ejemplo, los cristales de aragonito, cuyos depósitos alcanzan los dos metros de altura, sólo pudieron formarse en aguas saturadas de carbonato cálcico.

Las cubiertas de carbonato aportan una segunda línea de pruebas que apoyan la hipótesis de Kirschvink sobre el deshielo de la Tierra. Contienen dos isótopos del carbono, el carbono 12 habitual y el carbono 13, más raro y cuyo núcleo encierra un neutrón extra. Las relaciones de estos dos tipos de carbono son insólitas: se observan las mismas proporciones en los depósitos carbonatados de todo el mundo, pero nadie las había vinculado a un modelo de Tierra en bola de nieve. Junto con Alan Jay Kaufman y Galen Pippa Halverson hemos descubierto que esa relación isotópica se conserva a lo largo de cientos de kilómetros de roca descubierta en el norte de Namibia.

El dióxido de carbono que, liberado por los volcanes, alcanza los océanos tiene alrededor de un uno por ciento de carbono 13; el resto es carbono 12. Si la formación de rocas carbonatadas fuera el único proceso que detrayese carbono de los océanos, las rocas deberían tener la misma proporción de carbono 13 y de carbono 12 que las emisiones volcánicas. Ocurre que las algas y bacterias que medran en los océanos consumen también el carbono del agua circundante, pero su maquinaria fotosintética prefiere el carbono 12 al carbono 13. Por consiguiente, el carbono disponible para formar rocas carbonatadas en un océano lleno de vida como los que tenemos hoy, evidencia un cociente de carbono 13 a carbono 12 superior al del carbono que acaba de arrojar un volcán.

Los isótopos de carbono en las rocas neoproterozoicas de Namibia reflejan una situación diferente. Justo antes de los depósitos glaciales, la concentración de carbono 13 desciende bruscamente hasta niveles equivalentes a los de la emisión volcánica, signo de una caída de la actividad biológica en el momento en que los hielos cubrían los océanos a altas latitudes y la Tierra se encaminaba a una glaciación global. Una vez la capa de hielo cubrió los océanos, la actividad biológica debió de suspenderse, pero no existe registro del carbono en este intervalo temporal porque no podía formarse carbonato cálcico en un océano cubierto de hielo. La caída de carbono 13 persiste en todo el espesor de los depósitos carbonatados que recubren los depósitos glaciales; luego, la proporción de carbono 13 aumenta gradualmente varios cientos de metros más arriba, lo que indica a buen seguro una recuperación de la vida al final del período del efecto invernadero.

Se observan, asimismo, bruscas variaciones en este registro isotópico del carbono en las rocas carbonatadas que representan otras extinciones en masa, pero ninguna tan importante o duradera. Ni siquiera el impacto del meteorito que acabó con los dinosaurios, hace 65 millones de años, produjo un silencio tan prolongado de la actividad biológica.

En conjunto, la hipótesis de la Tierra en bola de nieve explica numerosas y extraordinarias observaciones realizadas en el registro geológico del Neoproterozoico: las variaciones isotópicas del carbono asociadas a los depósitos glaciales, la paradoja de las cubiertas de carbonatos, la existencia de glaciares de muy larga duración al nivel del mar en los trópicos y los depósitos de hierro asociados. La solidez de la hipótesis estriba en que da cuenta de todas esas características notables, ninguna de las cuales recibía una justificación satisfactoria por sí misma. Es más, creemos que la hipótesis arroja luz sobre la primitiva evolución de la vida animal.

La vuelta a la vida

En los años sesenta, Martin J. S. Rudwich y Brian Harland propusieron que el restablecimiento del clima después de la glaciación neoproterozoica allanó el camino para la ex-

PAUL E. HOFFMAN y DANIEL P. SCHRAG, adscritos a la Universidad de Harvard, aportan un bagaje complementario al estudio de la hipótesis de la Tierra en bola de nieve. Hoffman es geólogo de campo, que investiga rocas antiguas para descifrar la protohistoria de la Tierra. Schrag, geoquímico oceanográfico, se apoya en las variaciones químicas e isotópicas de los arrecifes de coral, sedimentos profundos y rocas carbonatadas para abordar la evolución del clima.

plosiva eclosión de vida pluricelular. Los eucariotas —células que tienen un núcleo encerrado por una membrana y de las cuales descendieron todas las plantas y animales— habían aparecido más de mil millones de años antes, pero los organismos más evolucionados existentes cuando se desató la primera glaciación neoproterozoica eran algas filamentosas y protozoos unicelulares. Siempre ha sido un misterio el porqué de que esos primitivos organismos tardaran tanto en diversificarse y constituir los planos de organización corporal que aparecieron de repente durante la explosión del Cámbrico.

Una serie de episodios globales, alternativamente de glaciación y calor agobiante, habrían impuesto un filtro ambiental en la evolución de la vida. Todos los eucariotas existentes procederían, por tanto, de los supervivientes del Neoproterozoico. La amplitud de las extinciones se refleja en los árboles filogenéticos, que ilustran la evolución e interrelación de los diversos grupos de organismos, en función de sus grados de semejanza. En la actualidad, los biólogos dibujan tales dendrogramas atendiendo a las secuencias de ácidos nucleicos.

La mayoría de los dendrogramas representan la filogenia de los eucariotas mediante una radiación tardía que corona un tronco largo y liso. La ausencia de ramificaciones precoces significaría que la mayoría de los linajes eucariotas fueron "podados" durante el Neoproterozoico. Los organismos que sobrevivieron a los episodios glaciales pudieron haberse refugiado en manantiales calientes de los fondos oceánicos y cerca de la superficie del hielo donde habría continuado el proceso de fotosíntesis.

Las pronunciadas variaciones de temperatura y gradientes químicos endémicos de los manantiales calientes y efímeros las preseleccionarían para la supervivencia en el infernal período que seguiría. Frente a las tensiones ambientales, muchos organismos responden con sustanciales modificaciones genéticas. Las restricciones apremiantes priman las mutaciones genéticas en un período breve, pues los organismos cuyos genes se modifican más rápidamente gozarán de más oportunidades en la adquisición de caracteres idóneos para la adaptación y proliferación.

Las comunidades que habitan en esas fuentes termales, muy distantes de la helada superficie del globo, han acumulado diversidad genética a lo largo de millones de años. Cuando dos grupos, aparecidos simultáneamente, quedan aislados entre sí largo tiempo y bajo diferentes condiciones, lo probable es que, en algún momento, la amplitud de las mutaciones genéticas dé lugar a una nueva especie. Tras cada glaciación, las poblaciones se hallarían sometidas a presiones de selección inéditas y en cambio constante, muy distintas de las condiciones que precedieron a la glaciación; tales condiciones favorecerían también la emergencia de nuevas formas de vida.

Martin Rudwick no insistió quizá bastante en que la mejoría climática que siguió a la gran glaciación neoproterozoica preparó el camino para la evolución de los primeros animales. Los propios sucesos climáticos extremos pudieron haber favorecido la aparición de la vida pluricelular.

Singularidad del fenómeno

Por tanto, los depósitos glaciales y las rocas carbonatadas del Neoproterozoico apuntan a un suceso climático singularísimo, la conformación de una Tierra en bola de nieve seguida de un período de invernadero más breve. Pero, ¿qué mecanismo desencadenó semejantes catástrofes? ¿Por qué el mundo se ha librado de ellas en su historia reciente?

Durante el Neoproterozoico, la radiación solar se debilitó en torno un 6 por ciento, con el consiguiente riesgo incrementado de glaciación global. A medida que envejece, se intensifica poco a poco el calentamiento del Sol, lo que podría explicar por qué no se han producido desde entonces episodios de bola de nieve. Pero hay indicios geológicos convincentes de que no se produjeron glaciaciones de ese tenor en los mil millones de años precedentes a la aparición del Neoproterozoico, con un Sol todavía más frío.

Más sólido es el testimonio de la posición particular de los continentes cerca del ecuador, durante el Neoproterozoico. Cuando los continentes se hallan más próximos a los polos, situación actual, las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono se mantienen altas, conservando caliente el planeta. Cuando las temperaturas globales se desploman y los glaciares cubren los continentes a altas latitudes, situación actual de la Antártida y Groenlandia, las capas de hielo impiden la erosión de las rocas subyacentes. Al sofocar así el proceso de enterramiento del carbono, el dióxido de carbono de la atmósfera se estabiliza muy concentrado y frena el avance de los hielos.

Ahora bien, agrupados los continentes en los trópicos, dejan los hielos de acumularse, aun cuando la Tierra se enfriase y se acercase al umbral crítico de glaciación global. El dióxido de carbono, "cierre de seguridad", se tornaría ineficaz, porque se hundiría en los sedimentos una cantidad excesiva de carbono.

Quizá no conozcamos nunca el verdadero desencadenante de una glaciación de esas proporciones, dada la precariedad de nuestras teorías sobre los cambios climáticos. Pero deberíamos estar alertados sobre la capacidad del planeta para cambios extremos. Durante el último millón de años, la Tierra ha experimentado su estado más frío desde que aparecieron los animales; ahora bien, hasta los mayores avances de los glaciares, hace 20.000 años, estuvieron lejos del umbral crítico de una Tierra en bola de nieve. En los próximos centenares de años, nuestra atención no se centrará tanto en las glaciaciones cuanto en las consecuencias de la actividad humana sobre el clima, pues el planeta se calienta en respuesta a las emisiones de dióxido de carbono. Pero, ¿podría volver un mundo helado en un futuro más remoto?

Todavía estamos a unos 80.000 años del máximo de la próxima edad del hielo. Tenemos tiempo para hallar la respuesta. Es difícil prever la trayectoria del clima de la Tierra en los próximos millones de años. Si persistiera la tendencia del postrer millón y si fallase el "cierre de seguridad" polar continental, podríamos experimentar otra catastrófica glaciación global, que arrojaría la vida en una nueva dirección.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ORIGIN AND EARLY EVOLUTION OF THE METAZOA. Dirigido por J. H. Lipps y P. W. Signor. Plenum Publishing, 1992.

THE ORIGIN OF ANIMAL BODY PLANS. D. Erwin, J. Valentine y D. Jablonski en *American Scientist*, vol. 85, n.º 2, págs. 126-137; marzo-abril 1997.

A NEOPROTEROZOIC SNOWBALL EARTH. F. P. Hoffman, A. J. Kaufman, G. P. Halverson y D. P. Schrag en *Science*, vol. 281, págs. 1342-1346; 28 agosto 1998.



De pronto, mientras ríe el chiste, la adolescente pierde el equilibrio y cae. Permanece quieta, completamente inmóvil. Oye cómo sus padres tranquilizan a sus amigos diciéndoles que no han de preocuparse, que se repondrá en unos minutos. Se siente avergonzada, incapaz de manifestar su rubor, mientras sus amigos se van. Aunque no puede hablar ni moverse, persiste en estado de alerta, sintiendo, oyendo y recordando cuanto ocurre a su alrededor. El episodio dura unos cinco minutos, más que sus ataques catapléjicos típicos —de apenas unos segundos—, aunque lejos de los 25 minutos del episodio mayor sufrido. De pronto pasa todo, con la misma brusquedad con que empezó. Se incorpora y vuelve a la tarea.

La cataplejía, la pérdida de tono muscular esquelético sin pérdida de consciencia, es uno de los síntomas que definen un trastorno neurológico enigmático llamado narcolepsia. Los ataques catapléjicos de narcolepsia se producen unas veces a consecuencia de la risa; otras los desencadenan las situaciones molestas, las interacciones sociales con desconocidos,

1. PERROS Y PERSONAS con narcolepsia sufren de un modo similar los ataques de cataplejía, la pérdida completa del tono muscular en estado vígil. En ambos, el ataque provoca que se les incline la cabeza, se les doblegue la espalda y les flaqueen las piernas, hasta llegar incluso a una pérdida completa del tono muscular. La cataplejía es distinta de los ataques de sueño que afectan a muchos narcolépticos: las personas oyen y recuerdan lo que se dice a su alrededor; los canes siguen con los ojos un objeto en movimiento.

NARCOLEPSIA

Caracteriza a este trastorno una somnolencia permanente. Quienes lo sufren pueden caer desplomados mientras realizan un ejercicio físico. Aunque es todavía una enfermedad enigmática, la ciencia dispone de nuevas pistas

Jerome M. Siegel

la cólera, el esfuerzo físico o las relaciones sexuales.

Característico también de la narcolepsia —por lo común el signo más incapacitante— es la somnolencia permanente en pleno día. Si el lector ha pasado 48 horas sin dormir, habrá experimentado la somnolencia que un narcoléptico sufre cada día. Por contra, duermen mal de noche. Y aunque se sienten descansados tras una siesta breve, la somnolencia vuelve pronto. En resumen, los narcolépticos se duermen en situaciones inconvenientes o peligrosas. Si no se someten a tratamiento, corren un riesgo alto de sufrir accidentes si conducen, y suelen tener problemas de rendimiento en los estudios y el trabajo.

A lo largo de los últimos años se ha ido corriendo el velo de misterio que envuelve a esta enfermedad debilitante, muy común. Mi equipo ha identificado las regiones específicas del cerebro involucradas en la cataplejía y ha descubierto que son las mismas regiones que evitan que nos movamos en sincronía con nuestros sueños (por ejemplo, que nuestras piernas se agiten cuando soñamos que estamos huyendo). Encontró también la primera prueba de degeneración nerviosa en la narcolepsia. Otros expertos han aislado un gen que, si muta, puede provocar narcolepsia en perros. Quizá lo más interesante sean los indicios de que la narcolepsia podría constituir una enfermedad autoinmunitaria, en la cual el sistema inmunitario ataca el tejido cerebral propio como si se tratara de otro extraño.

El trastorno presenta rasgos múltiples y extraordinarios. Además de la cataplejía y la somnolencia, son también síntomas clásicos la parálisis del sueño y las alucinaciones hipnagógicas. Se llama parálisis del sueño a la incapacidad de moverse inmediatamente después de despertarse o entrar en vigilia. Aunque los individuos normales pueden tener períodos cortos de parálisis de sueño unas cuantas veces en su vida, se trata de un incidente diario para muchos narcolépticos. Las alucinaciones hipnagógicas son experiencias oníricas durante el estado de vigilia que a menudo incorporan elementos del entorno. Ocurren cuando los narcolépticos están más soñolientos. Sin embargo, no todos los pacientes sufren por igual estos síntomas. La severidad de la cataplejía y de la somnolencia varía de un sujeto a otro.

La narcolepsia muestra, asimismo, una amplia variabilidad en su incidencia. La frecuencia oscila entre una de cada 600 personas en Japón a una de cada 500.000 en Israel. Factores genéticos unidos a la etnia o posibles condiciones ambientales podrían intervenir en esa diversidad. Por ceñirnos a Estados Unidos, la incidencia global de la narcolepsia decuplica la de la esclerosis lateral amiotrófica (enfermedad de Lou Gehrig), quintuplica la de la fibrosis quística, es la mitad de la esclerosis múltiple y un cuarto de la enfermedad de Parkinson. El síndrome narcoléptico suele iniciarse en la adolescencia y juventud. Los síntomas empeoran durante unos años, para luego estabilizarse.

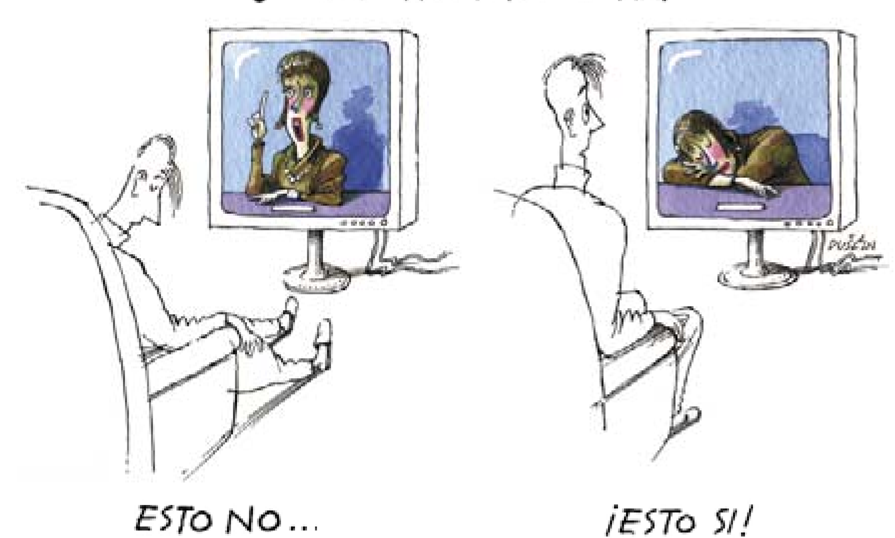
Sueño y narcolepsia

La narcolepsia está relacionada con una interrupción del mecanismo de control del sueño. El ciclo de sueño consta de dos fases principales: sueño REM (movimiento ocular rápido) y sueño no-REM.

En el estado de sueño no-REM los músculos están relajados aunque mantienen cierto tono, la respiración es regular, la corteza cerebral genera ondas de alto voltaje y se reduce al mínimo el consumo cerebral de energía. Aunque el sueño REM comparte con el no-REM la pérdida de consciencia del entorno, difiere bastante en su fisiología. El ritmo cardíaco y la respiración son irregulares; se producen movimientos oculares rápidos característicos; la corteza genera ondas de bajo voltaje rápidas e irregulares, similares a las que se presentan en la vigilia alerta; se viven ensoñaciones muy agitadas, y el metabolismo del cerebro suele exceder los niveles observados en estado de vigilia. Durante el sueño REM, se muestra ausente el tono de los músculos posturales, como los de espalda y piernas, aunque las contracciones musculares interrumpan ocasionalmente la inactividad motora.

Las personas que no padecen narcolepsia inician el reposo nocturno en sueño no-REM; al cabo de unos 90 minutos pasan a la fase de sueño REM. Por contra, los narcolépticos entran a menudo directamente en sueño REM. Debido a este rasgo —y a que los narcolépticos experimentan una pérdida del tono muscular y alucinaciones oníricas que ocurren durante el sueño REM— se ha postulado que los síntomas de narcolepsia podrían resultar de un comienzo inadecuado de algunos aspectos del sueño REM.

Aunque los problemas del sueño son los síntomas habituales de narcolepsia, la investigación básica partió de la cataplejía. La somnolencia es un fenómeno normal; lo anormal es la cantidad de somnolencia. Entraña no poca dificultad el determinar la



anormalidad de ciertos episodios de somnolencia que presentan los narcolépticos. Pero la cataplejía nunca se da en individuos sanos, es fácil de cuantificar y tiene un comienzo súbito que permite precisar la marcha de los acontecimientos nerviosos que la desencadenan. Merced a la observación y manipulación de la cataplejía entenderemos mejor la patología de la narcolepsia.

Perros narcolépticos

A comienzos de los años setenta se produjo un avance importante en el estudio de la narcolepsia, al comprobarse que los perros manifestaban síntomas muy similares a los asociados a la narcolepsia humana. William C. Dement recibió una camada de Doberman (y más tarde otra de perdigueros Labrador), todos ellos narcolépticos. El patrón de transmisión hereditaria de la enfermedad era el propio de los rasgos recesivos; el perro sólo desarrollaba la enfermedad si la heredaba a la vez del padre y de la madre. Por tanto, cuando Dement cruzaba dos perros narcolépticos, toda la prole era narcoléptica. Los canes experimentaban cataplejía durante una actividad vigorosa o cuando se excitaban al ofrecérseles sus comidas favoritas.

En mi laboratorio hemos estudiado la electrofisiología de estos perros en busca de las causas de los síntomas de la narcolepsia, tan extraños. Mediante microelectrodos registramos los impulsos eléctricos de las células nerviosas, o neuronas, del tallo cerebral mientras se intercomunican con células de otras áreas del cerebro y la médula espinal.

Empezamos con registros del tallo cerebral, orientados por los experimentos que en los años cuarenta realizó W. Magoun. Descubrió Magoun que, si estimulaba eléctricamente el bulbo mediano (una parte del tallo cerebral), desaparecía el tono muscular, lo mismo que si le hubiera dado a un interruptor para cortar el movimiento. En el momento de este descubrimiento, la epidemia de poliomielitis asolaba EE.UU. Magoun avanzó la hipótesis de que el deterioro de la médula podía tener que ver en el aumento del tono muscular observado en la fase aguda de la polio, así como con el aumento de tono observado en otras neuropatías.

Magoun no relacionó esta observación con el sueño. Su descubrimiento precedió al del sueño REM en 1953 y al hallazgo subsiguiente de su parálisis muscular asociada. En nuestros días, la investigación animal respalda la tesis del sistema de control del tono muscular: aunque la función principal del sistema de control del tono muscular en la médula sea la supresión de la actividad muscular en el sueño REM, importa también en la regulación del nivel general del tono muscular en la vigilia. Esta región muestra una activación nula mientras los animales se mueven, moderada cuando se sientan o se tumban, elevada durante el sueño no-REM y máxima en el sueño REM. Cuando tratamos de relajarnos o “apagar” los músculos, lo que buscamos en realidad es “encender” esa región del cerebro.

Basados en los hallazgos de Magoun, nos preguntábamos si de los episodios de cataplejía que padecen los narcolépticos podríamos responsabilizar a la actividad anormal del bulbo mediano. Demostramos en 1991 que ése era el caso. Las neuronas de dicha región se excitaban cuando los perros narcolépticos sufrían un ataque catapléjico. Agréguese a ello que, en los animales normales, las células de la misma zona del bulbo mediano sólo alcanzaban una excitación notable durante la fase de sueño REM. Nuestros hallazgos tenían sentido, pues sabíamos por otros estudios que el sueño REM era el único momento en que los individuos normales perdían el tono muscular.

En nuestro laboratorio Elizabeth Schenkel prosiguió en esa línea de investigación. Con éxito. Demostró que los animales con el bulbo mediano dañado, y plenamente normales en lo demás, se movían inquietos durante el sueño REM, en vez de permanecer relajados. Michel Jouvet y Adrian R. Morrison habían hallado que la lesión de niveles superiores del tallo cerebral que conectan con la médula producía animales que levantaban sus cabezas, caminaban y parecían atacar a adversarios imaginarios durante el sueño REM. Por alguna razón, en la narcolepsia hay un grupo de neuronas que se activa durante el estado de vigilia, siendo así que le correspondería excitarse sólo durante el sueño REM para suprimir el tono muscular y evitar complejos programas motores que acompañan a nuestros sueños.

También en mi laboratorio, Frank Wu realizó una serie de ensayos que pusieron de manifiesto la implicación de un grupo de células nerviosas del *locus coeruleus* en el sueño REM y la narcolepsia. Esas células liberan noradrenalina, neurotransmisor que utilizan las neuronas para comunicarse entre sí. Una vez segregada en el torrente circulatorio, la noradrenalina participa en la respuesta del “planta cara o huye”, propia de los momentos de emergencia. Se ha demostrado que en los animales normales las neuronas del *locus coeruleus* que sintetizan noradrenalina se mantienen activas en vigilia e inactivas cuando los animales caen en sueño REM. Nuestros experimentos con perros narcolépticos revelan que las células del *locus coeruleus* se tornan inactivas antes y después de la cataplejía, igual que en sueño REM.

JEROME M. SIEGEL enseña psiquiatría y es miembro del instituto de investigación cerebral del hospital clínico de la Universidad de California en Los Angeles.

El cese de la actividad de las células que contienen noradrenalina elimina de las neuronas motoras una fuente de excitación, a la vez que en la médula se pone en marcha el sistema paralelo responsable de inhibir las neuronas motoras. La pérdida de excitación más el aumento concurrente de inhibición provocan la caída drástica de actividad y excitabilidad de las neuronas motoras. Cuando las neuronas motoras dejan de emitir descargas, se relajan los músculos que controlan. En el sueño REM la reducción de la excitabilidad de las neuronas motoras evita que respondan a las señales motoras que acompañan a los sueños. En la cataplejía la misma reducción de la excitabilidad evita que las neuronas motoras respondan a los intentos de movimiento de los narcolépticos.

El registro de la actividad de las neuronas en los perros narcolépticos nos ha proporcionado nuevos datos sobre el mecanismo que desencadena la cataplejía. Pero, ¿por qué estos fenómenos inhibidores suceden durante la vigilia en los narcolépticos? ¿Por qué no se limitan al sueño REM, igual que en los individuos sanos?

Carecemos de una solución satisfactoria. Ello no empece que dispongamos, merced a un par de estudios genéticos recientes, de nuevas pistas que podrían arrojar luz. El equipo

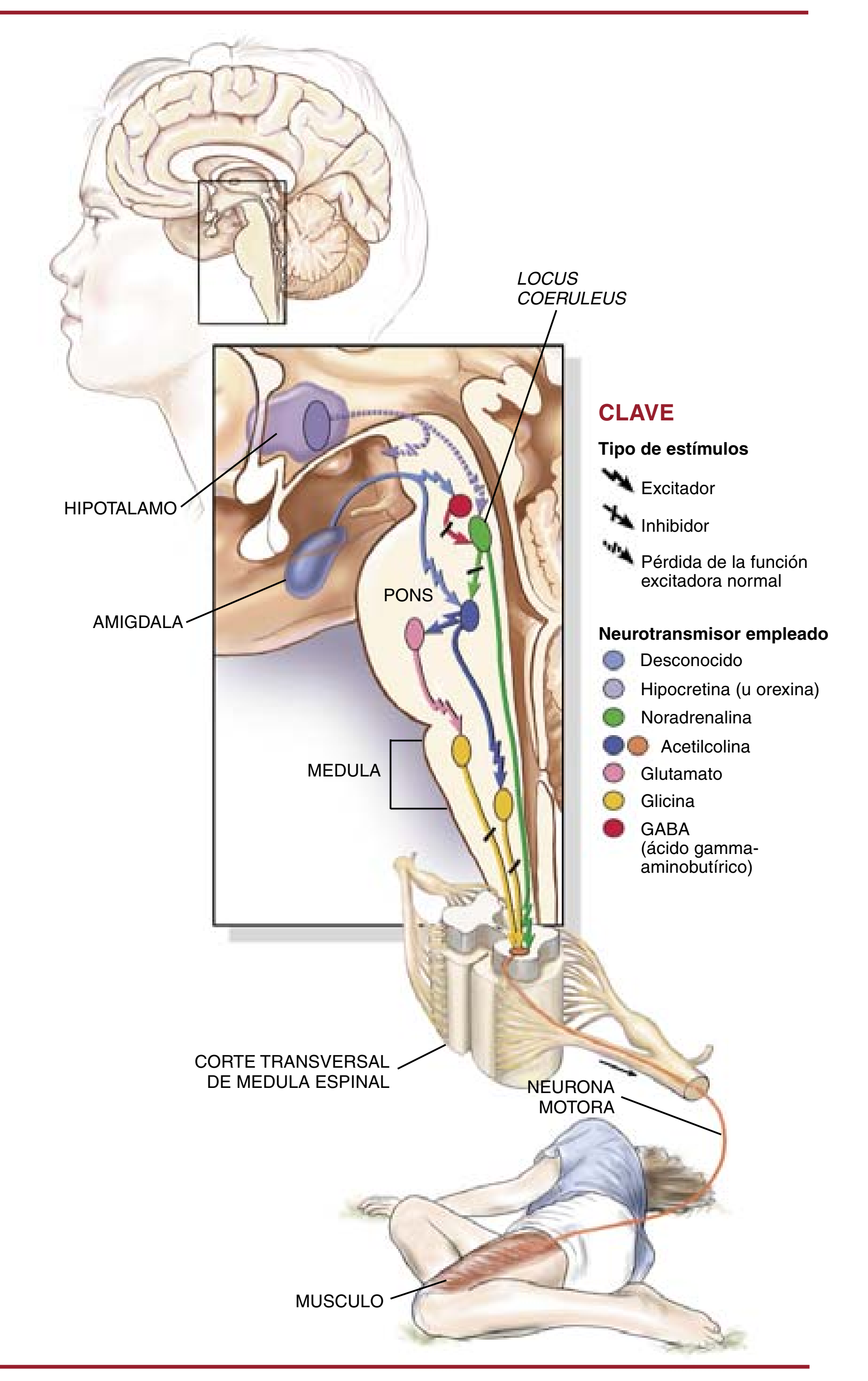
Circuitos nerviosos de la narcolepsia

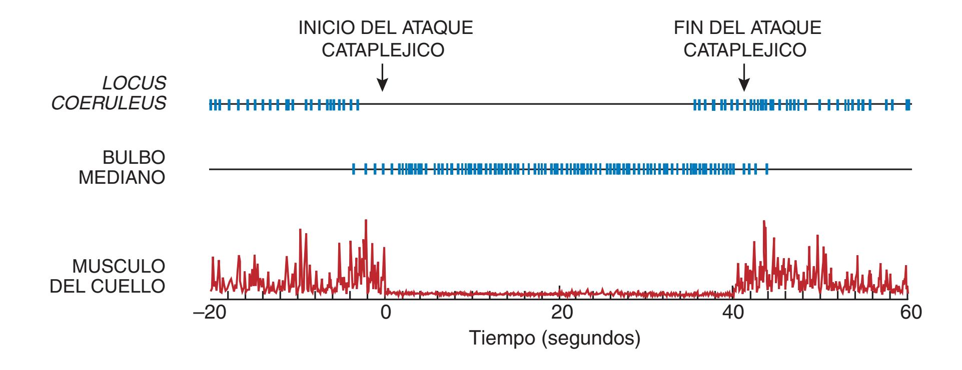
En la narcolepsia, los circuitos del cerebro y la médula espinal que, en condiciones normales, inhiben el movimiento durante el sueño entran en funcionamiento inoportunamente durante los ataques catapléjicos; en consecuencia, causan una pérdida del tono muscular que mantiene la postura. La figura ilustra un modelo simplificado de la sucesión probable de los acontecimientos.

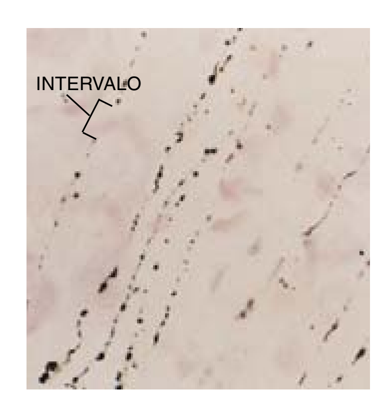
La degeneración de las células del prosencéfalo elimina las señales inhibidoras de interés en la regulación de la actividad de las células de la amígdala, una estructura implicada en las respuestas emocionales. La pérdida de las señales inhibidoras en la amígdala aumenta la actividad de las conexiones entre la amígdala y el *pons* (*azul claro*), que a su vez mueve un "freno" celular (*rojo*) que reduce la actividad en el *locus coeruleus* (*verde*). Este suprime una fuente de excitación de las neuronas (*naranja*) que controlan los músculos.

La pérdida celular de la amígdala activa, de forma indirecta, dos circuitos en el *pons* (*rosa y azul oscuro*) que estimulan nervios en dos áreas del bulbo mediano (*amarillo*) que inhibe enérgicamente las neuronas motoras. El resultado de la simultánea pérdida de excitación y el comienzo de la inhibición en las neuronas motoras es una pérdida del tono muscular, que hace que el narcoléptico se desplome.

Estudios recientes en perros narcolépticos abonan la idea de que las mutaciones operadas en los receptores del neurotransmisor hipocretina (u orexina), en el hipotálamo lateral, pueden causar también cataplejía y otros síntomas de narcolepsia. Las mutaciones podrían originar este trastorno mediante la supresión de las señales excitadoras (*violeta*) que reciben las células que mantienen el tono muscular y la alerta, así como mediante la puesta en marcha de la degeneración observada en el prosencéfalo. *—J.M.S.*







2. LOS REGISTROS ELECTRICOS (*izquierda*) tomados del cerebro y los músculos del cuello de un perro con narcolepsia muestran que las células del *locus coeruleus* persisten inactivas durante la parálisis muscular de un ataque catapléjico, mientras que las células del bulbo mediano están activas. Los registros cerebrales (*azul*) se obtuvieron mediante el empleo de microelectrodos; los musculares (*rojo*), con un electromiógrafo. Estos patrones de actividad anómala pueden ser el resultado de la degeneración de las células en la amígdala. Una sección de la amígdala de un perro (*derecha*) muestra espacios múltiples en los axones de las neuronas (*líneas negras*).

de Emmanuel Mignot ha identificado el gen responsable de la narcolepsia en los perros. Ha descubierto que los canes afectados presentan una mutación en el gen del receptor del neurotransmisor hipocretina, también llamado orexina.

Los receptores del neurotransmisor se encuentran en las superficies de las neuronas, como si de cerraduras moleculares se tratara. Cuando la "llave" del neurotransmisor se acopla al receptor, se desencadena una serie de procesos químicos en el interior de la célula receptora que la impulsa a realizar alguna acción, por ejemplo, enviar su propia señal neurotransmisora a una tercera célula. El grupo de Mignot descubrió que la mutación portada por los perros narcolépticos producía receptores de hipocretina (u orexina) que carecen de una parte fundamental, lo que les impide responder con normalidad a los mensajes recibidos.

En un estudio complementario, el equipo encabezado por Masashi Yanagisawa ha obtenido ratones cuyas neuronas no pueden enviar el mensaje hipocretina. Han observado que estos ratones presentan también síntomas de narcolepsia; así, sueño REM en el comienzo del sueño.

La hipocretina se produce exclusivamente en el hipotálamo, región profunda del cerebro encargada de regular el peso del cuerpo y de controlar el equilibrio hídrico, las funciones de la pituitaria, la temperatura corporal y otros procesos. Las neuronas hipotalámicas productoras de hipocretina establecen conexiones con otras neuronas cerebrales implicadas en el estado de alerta; cítense a este respecto las neuronas del prosencéfalo y del tallo cerebral que liberan acetilcolina, así como otras neuronas que segregan histamina y serotonina. Están también vinculadas con neuronas del tallo; por ejemplo, con las del *locus coeruleus*, que desempeñan un papel importante en el control del tono muscular.

Las mutaciones que afectan al sistema de hipocretina (u orexina) podrían ser responsables de algunos casos de narcolepsia en el hombre, pero no parece verosímil que la mayoría de las personas con narcolepsia sufran mutaciones en los genes vinculados a la síntesis de hipocretina o su receptor. La mayoría de los narcolépticos no tienen ascendientes narcolépticos; además, la enfermedad no surge hasta el segundo o tercer decenio de vida. Agréguese a ello que en tres cuartas partes de los casos en que un gemelo idéntico padece narcolepsia, el otro gemelo se halla libre. Del conjunto de estas observaciones se desprende la importancia de las condiciones ambientales en la narcolepsia humana. El entorno podría causar un deterioro del sistema hipocretina (u orexina), y así remedar los síntomas causados por las mutaciones, o podría instar la degradación de los sistemas estrechamente relacionados con las neuronas.

¿Enfermedad autoinmunitaria?

Para algunos autores, la narcolepsia surge cuando determinados agentes, desconocidos, del entorno estimulan una reacción autoinmunitaria que acaba por dañar las neuronas de los circuitos cerebrales que controlan el estado de alerta y el tono muscular. En 1984, el equipo de Yutaka Honda descubrió que todos los integrantes de un grupo de 135 japoneses narcolépticos compartían un aspecto de su tipo de tejido; ello significaba que sus sistemas inmunitarios utilizaban la misma molécula, un antígeno de histocompatibilidad o HLA (antígeno leucocitario humano), para distinguir lo propio de lo extraño. La molécula compartida se encontró en un 35 por ciento aproximadamente de los narcolépticos japoneses. Si bien el tipo de HLA era insuficiente para inducir la narcolepsia, los hallazgos de Honda indicaban que el tipo de HLA afectaba sobremanera a la susceptibilidad a la enfermedad.

Las moléculas HLA son estructuras ahorquilladas que las células emplean para mostrar al sistema inmunitario fragmentos de las proteínas que contienen. Las células del sistema inmunitario atacan las sustancias extrañas y las células infectadas por virus, que obligan a las células a sintetizar proteínas víricas en vez de las proteínas normales.

El tipo de HLA de una persona remite a su tipo de tejido, o histocompatibilidad, porque entre individuos con el mismo perfil de HLA se pueden trasplantar tejidos u órganos. Ciertas enfermedades autoinmunitarias tienden a afectar a los individuos que poseen determinados tipos de HLA, por la presumible razón de que estos tipos de HLA cuando se engarzaran a antígenos peculiares podrían parecerse a proteínas naturales del cuerpo, provocando así que el sistema inmunitario cayera en el engaño y atacara a células normales.

El próximo paso será demostrar si el sistema inmunitario de los narcolépticos toma por extraños los receptores

de hipocretina (u orexina) de su propio cerebro. Puesto que el cuerpo continuaría regenerando los receptores, es de esperar que la respuesta autoinmunitaria se prolongara mientras persistiera la enfermedad, pero no se ha detectado todavía tal respuesta en individuos con narcolepsia.

En un marco explicativo distinto, la respuesta autoinmunitaria podría destruir las neuronas o partes de éstas que porten los receptores de hipocretina, con lo que cesaría la respuesta autoinmunitaria. De forma alternativa, la deficiencia podría darse en los circuitos nerviosos que regulan el sueño, si bien en una zona más distante que las células implicadas en el sistema hipocretina. La destrucción autoinmunitaria de neuronas o receptores del *locus coeruleus* o de otras regiones del cerebro relacionadas con el sueño podrían producir el síndrome, aun cuando las neuronas con hipocretina y sus receptores funcionasen en normalidad.

Del examen de cerebros de personas que hayan sufrido el trastorno saldrán las pruebas que confirmen el origen autoinmunitario. Desde que Jean Baptiste Edouard Gélineau designara la narcolepsia como un síndrome diferenciado en 1880, se han venido examinando los cerebros de pacientes en una búsqueda infructuosa de una lesión neurológica que explicara los síntomas de la enfermedad. En los años ochenta y noventa del siglo XX, los trabajos de Mignot y Dement junto a los de Ted L. Baker y Thomas S. Kilduff sacaron a la luz que los cerebros de perros narcolépticos presentaban mayor número de receptores de acetilcolina, dopamina y noradrenalina y niveles supranormales de los propios neurotransmisores.

A comienzos de los noventa, Michael S. Aldrich apreció cambios similares en los cerebros de personas narcolépticas. Con todo, tales alteraciones en los niveles de receptores y de neurotransmisores pueden obedecer a cambios emocionales, trastornos del sueño incluidos; se desconoce, pues, si son la causa o el resultado de la enfermedad.

Abordé con mi equipo esa cuestión y nos planteamos si los patólogos habían fracasado en su búsqueda de pruebas sólidas de lesión cerebral porque habían realizado los exámenes en un momento equivocado del proceso de la narcolepsia. Se trata de una enfermedad crónica, aunque no progresiva. Una vez establecidos los síntomas, los narcolépticos no tienden a empeorar ni a mejorar. Esto abona la idea de que la degeneración podría producirse en un tiempo breve, más o menos durante el período en que el paciente desarrolla los primeros signos de la enfermedad. Las células de mantenimiento del cerebro eliminarían mucho antes de que los pacientes murieran los restos que pudieran quedar de los procesos degenerativos acontecidos a los veinte años de edad, y muchas pistas permanecerían borradas por la degeneración normal imputable al envejecimiento. Pasaría inadvertida la pérdida de neuronas, a menos que las células muertas se fueran concentrando en un área particular, como en la enfermedad de Parkinson, o a menos que muchas neuronas murieran, como en la enfermedad de Alzheimer.

Cartografía cerebral

Así las cosas, mi equipo examinó los cerebros de perros narcolépticos en cuanto aparecieron los síntomas. Mediante una tinción detectora de las neuronas dañadas, encontramos pruebas claras de que las neuronas de ciertas áreas cerebrales se iban degenerando entre uno y dos meses de edad, justo antes y durante el comienzo de los síntomas. Las pruebas de la degeneración se desvanecían para cuando los perros tenían seis meses.

La degeneración se acentuaba en la amígdala, una estructura cerebral conocida por estar implicada en la emoción y en la inducción del sueño, así como en regiones adyacentes de la base del prosencéfalo. Llamaba la atención que el tallo cerebral, pese a mediar algunos síntomas de la narcolepsia, no mostrara signos manifiestos de degeneración. Ante esa situación, creemos que el deterioro de la amígdala y zonas adyacentes del prosencéfalo puede causar los síntomas motores de la narcolepsia; y hacerlo por una activación incorrecta de circuitos del tallo cerebral que no sufren lesión alguna.

Según es frecuente en la ciencia, nuestras observaciones despejaron una incógnita e introdujeron otras. ¿A qué atribuir la degeneración de la amígdala y de otras regiones del prosencéfalo en los perros jóvenes? ¿Es el resultado de un proceso autoinmunitario, como indicaba el estudio en humanos? ¿Hemos de inculpar del deterioro a la anormalidad observada en el receptor hipocretina (u orexina)? ¿Es posible prevenir e incluso revertir el deterioro?

Mientras se resuelven las dudas, todo cuanto podemos ofrecer a las personas narcolépticas son fármacos que controlen sus síntomas. Podemos contrarrestar parte de la somnolencia mediante el empleo de estimulantes como Rubifen (metilfenidato) y Cylert (pemolina) o anfetaminas, que activan los receptores dopaminérgicos para aumentar el nivel global de alerta. Otro fármaco, el Modiodal (modafinilo), cuyo mecanismo de acción no está claro, podría ejercer su acción mediante la estimulación de las neuronas secretoras de hipocretina y otras poblaciones nerviosas del hipotálamo que, a su vez, activarían los sistemas cerebrales de alerta. Por desgracia, la eficacia de tales fármacos se limita a períodos cortos y presentan efectos secundarios desagradables.

Para prevenir los ataques catapléjicos de la narcolepsia, los médicos pueden prescribir agentes que aumenten la disponibilidad de noradrenalina en el cerebro. Así, los inhibidores de la monoaminooxidasa, que bloquean la enzima que destruye la noradrenalina liberada por las neuronas; los fármacos como el Prozac (fluoxetina), cuyos productos de descomposición activan los receptores de noradrenalina, y el gamma-hidroxibutirato (GHB), cuyo mecanismo de acción no está claro, pueden también ser eficaces contra la cataplejía.

Ese avance en los procesos de la narcolepsia nos avala para confiar en que mejorará el tratamiento de esta enfermedad con las nuevas medicaciones que reparan el desequilibrio de los sistemas de hipocretina (u orexina), noradrenalina y otros neurotransmisores que controlan el ciclo sueño-vigilia. Sin duda, estamos entrando en una etapa prometedora para la investigación de la narcolepsia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ENCYCLOPEDIA OF SLEEP AND DREAMING. Dirigido por Mary A. Carskadon. Macmillan, 1993.

SLEEP AND DREAMING. Alan Rechtschaffen y Jerome M. Siegel en *Principles of Neural Science*. Cuarta edición. Dirigido por Eric R. Kandel, James H. Schwartz y Thomas M. Jessell. McGraw-Hill, 1999.

BRAINSTEM MECHANISMS GENERATING REM SLEEP. Jerome M. Siegel en *Principles and Practice of Sleep Medicine*. Tercera edición. Dirigido por Meir H. Kryger, Thomas Roth y William C. Dement. W. B. Saunders, 2000.

Biología de las chaperoninas

Muchas proteínas son incapaces por sí solas de alcanzar su conformación nativa. Las chaperoninas son unos complejos proteicos que facilitan el plegamiento adecuado de aquéllas

José María Valpuesta, Oscar Llorca y Sergio Marco

"La conformación nativa de una proteína está determinada por la totalidad de sus interacciones atómicas y, por tanto, por su secuencia aminoacídica." En esta afirmación queda enunciada una de las hipótesis que más interés ha suscitado en el campo de la biología molecular en los últimos treinta años, la relativa al plegamiento de las proteínas.

De acuerdo con esa hipótesis, avanzada en 1953 por Christian Anfinsen, la información requerida para que una cadena de aminoácidos se pliegue se encuentra en la propia secuencia. Desde los años veinte, el progreso de la química permitió caracterizar las proteínas como estructuras homogéneas. Además de su tamaño grande, en comparación con los lípidos o los azúcares, las proteínas presentan una notable complejidad. En 1953 Frederick Sanger determinó la secuencia de los aminoácidos componentes de la insulina. Se lograron luego las primeras síntesis de péptidos de interés biológico, las hormonas oxitocina y vasopresina. Se realizaron también las primeras hipótesis sobre los tipos de estructuras que las proteínas pueden adoptar en solución (hélice α, lámina β y otras). Se dio un paso más y se vinculó la estructura a la función. Pero, ¿mediante qué mecanismos las moléculas de proteína adoptan la conformación adecuada al objeto de cumplir su función? ¿Cómo se pliegan?

El principio de autoplegamiento de las proteínas descrito por el equipo de Christian Anfinsen, y los experi-

DIFERENTES SISTEMAS DE CHAPERONAS MOLECULARES

	BACTERIAS		LEVADURAS		
SISTEMA*	NOMBRE	FUNCION	NOMBRE	FUNCION	COMPORTAMIENTO
100	ClpA	TOLERANCIA FRENTE A ESTRES TERMICO	Hsp104	TOLERANCIA FRENTE A ESTRES TERMICO	CITOSOL
90	HtpG	SE UNE A PROTEINAS DESNATURALIZADAS	Hsp90	SE UNE A PROTEINAS DESNATURALIZADAS. LAS PLIEGA O LAS LLEVA A SU COMPARTIMENTO	CITOSOL
70	DnaK	SE UNE A PROTEINAS RECIEN SINTETIZADAS	SSA1-4	SE UNEN A PROTEINAS RECIEN SINTETIZADAS	CITOSOL
			SSB1,2	SE UNEN A POLISOMAS	
			SSC1	SE UNE A PROTEINAS IMPORTADAS	MITOCONDRIA
60	GroEL	SE UNE A INTERMEDIARIOS DE PLEGAMIENTO. ASISTE EN EL PLEGAMIENTO	Hsp60	SE UNE A PROTEINAS IMPORTADAS. ASISTE EN EL PLEGAMIENTO	MITOCONDRIA
			CCT	ASISTE EN EL PLEGAMIENTO DE ACTINA Y TUBULINA	CITOSOL
40	DnaJ	SE UNE A PROTEINAS DESNATURALIZADAS. INTERACCIONA CON DnaK	MDE1	INTERACCIONA CON Hsp70 SSC1	MITOCONDRIA
			YDJ1	INTERACCIONA CON Hsp70 SSA1. INVOLUCRADA EN EL TRANSPORTE A ORGANULOS	CITOSOL
20-25	GrpE	INTERACCIONA CON DnaK	MGE1		
10	GroES	ASISTE A GroEL EN SU ACTIVIDAD PLEGADORA	Hsp10	ASISTE A Hsp60 EN SU ACTIVIDAD PLEGADORA	MITOCONDRIA

**PESO MOLECULAR DEL MONOMERO*

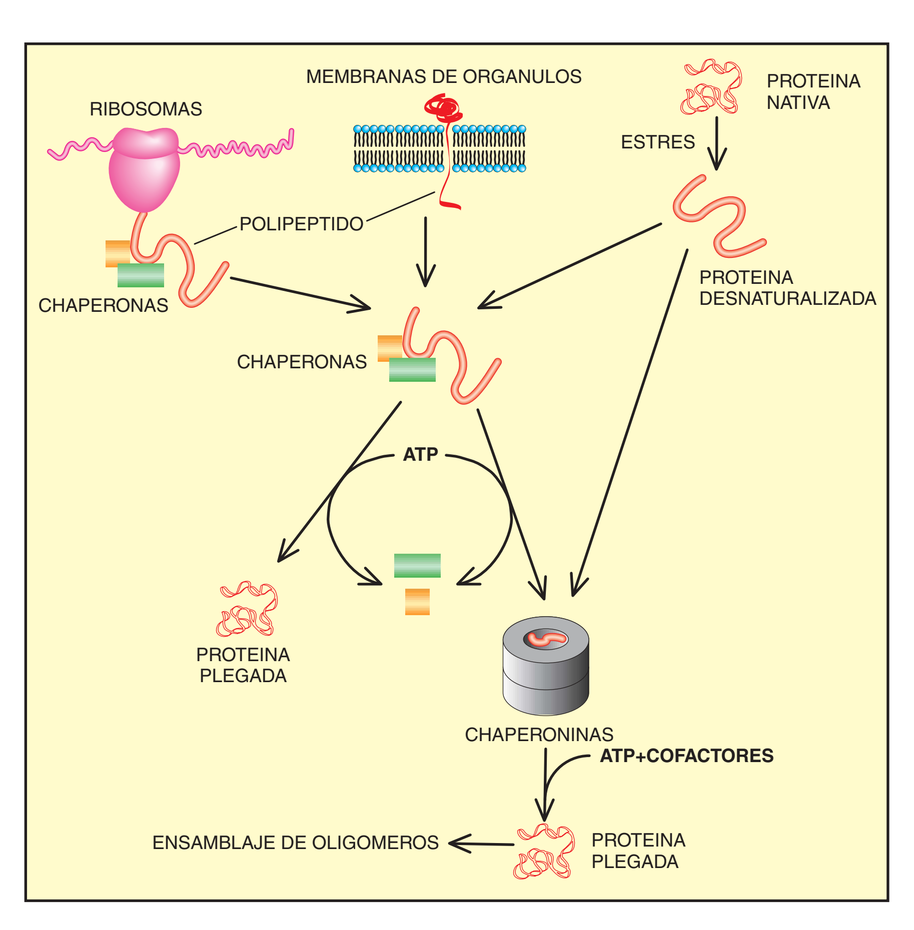
1. CLASIFICACION DE LAS CHAPERONAS moleculares, parcial y provisional. Nuevas familias se están incorporando continuamente. En la tabla sólo se muestran las chaperonas pertenecientes a procariotas (*E. coli*) y a eucariotas (levaduras). Muchas de estas proteínas, aunque no todas, son proteínas de choque térmico. Cumplen funciones muy dispares. Las chaperonas moleculares con un peso cercano a los 60 kDaltons se denominan chaperoninas.

mentos subsiguientes que demostraron su validez, provocaron una revolución en biología molecular y crearon el nuevo campo que ha dado en llamarse del plegamiento de proteínas. Anfinsen sugería en 1963 que "otra molécula (por ejemplo un anticuerpo, otra proteína o incluso la misma proteína) pudiera influir en el proceso de plegamiento mediante reacciones intermoleculares".

Se comprobó muy pronto que no basta el proceso de autoplegamiento para garantizar el plegamiento de las proteínas *in vivo*. El plegamiento no es en muchas ocasiones espontáneo, sino que requiere de la interacción entre proteínas ya existentes y de consumo de energía, de ATP. A esas acompañantes moleculares se las llamó "chaperonas moleculares".

El término lo acuñó Ronald Laskey en 1978 para describir las propiedades de la nucleoplasmina, una proteína nuclear que interviene en el ensamblaje de los nucleosomas a partir de ADN y de histonas. La nucleoplasmina, una proteína fuertemente ácida, se une transitoriamente a las histonas, con lo que reduce su carga positiva e inhibe la tendencia de éstas a agregarse inespecíficamente con el ADN. Molécula dotada de carga negativa, la nucleoplasmina no proporciona información espacial a las histonas para que se plieguen adecuadamente, ni es un componente estructural de los nucleosomas, pero su interacción con las histonas permite que las propiedades de autoplegamiento de éstas predominen sobre la tendencia a unirse al ADN en razón de sus cargas opuestas. La acción de la nucleoplasmina, fugaz, ni genera ni rompe enlaces covalentes.

Las chaperonas moleculares son proteínas que unen y estabilizan conformaciones inestables de otras proteínas. Mediante uniones y liberaciones controladas, facilitan la conformación nativa de las proteínas o el ensamblaje entre éstas para crear oligómeros. De la familia de las chaperonas forman parte numerosas proteínas de distinta secuencia y diverso peso molecular. Las chaperoninas, en particular, desempeñan un papel muy activo en el plegamiento de proteínas.



2. LAS CHAPERONAS moleculares ejercen varios efectos en el plegamiento de las proteínas. Chaperonas de diversos tipos se unen a polipéptidos recién sintetizados en los ribosomas (*arriba a la izquierda*), a proteínas que atraviesan las membranas de orgánulos (*arriba en el centro*) o a proteínas que se han desnaturalizado (*arriba a la derecha*). Esta unión, en un número elevado de casos, desempeña un papel protector y evita que las proteínas alcancen un estado de agregación irreversible. Sin negar que las chaperonas intervengan de forma directa en el plegamiento de las proteínas (*centro*), en la mayoría de los casos parecen transportar los polipéptidos desnaturalizados hasta las chaperoninas, donde se pliegan (*debajo*).

Las chaperoninas

Sean Hemmingsen acuñó en 1986 el término chaperonina para designar una familia de proteínas que comparten homología en su secuencia aminoacídica y actúan como chaperonas en cloroplastos, mitocondrias y bacterias. Su peso molecular está en torno a los 60 kilodalton.

La primera chaperonina descrita como tal fue la proteína que se une a la ribulosa bifosfato carboxilasa, RBP (*Rubisco binding protein*). La enzima Rubisco se encarga de asimilar, a partir de CO_2, el carbono por los cloroplastos. El grupo de John Ellis, de la Universidad de Warwick, descubrió que la subunidad grande de la Rubisco tiende a formar agregados insolubles cuando se aísla. Ellis y su equipo encontraron una proteína que se une a la Rubisco e impide su agregación. Puesto que RBP, de 60 kilodalton de peso molecular, no guarda ninguna homología con la nucleoplasmina, se pensó que las dos proteínas constituían casos especiales, ideados *ad hoc* por la naturaleza para tratar con proteínas oligoméricas (histonas y Rubisco), cuyo plegamiento podía presentar dificultades.

En 1986, Hugh Pelham, del Laboratorio de Biología Molecular de Cambridge, lanzó la hipótesis de que RBP, la nucleoplasmina y otras proteínas asociadas a estados de choque térmico o de aumento de temperatura celular (hsp, *heat shock proteins*) actuarían como chaperonas moleculares; sugirió también que el mecanismo de plegamiento podría ser un fenómeno común en la naturaleza. Las técnicas de comparación de secuencias respaldaron su hipótesis. La proteína que se une a la ribulosa bifosfato carboxilasa manifestaba una homología del 50 % con la secuencia de GroEL, una proteína de *E. coli* indispensable en la morfogénesis de ciertos bacteriófagos.

El descubrimiento de la homología entre RBP y GroEL provocó

JOSE MARIA VALPUESTA, OSCAR LLORCA y SERGIO MARCO estudian desde hace varios años la estructura y bioquímica de las chaperoninas. Valpuesta y Llorca, adscritos al Centro Nacional de Biotecnología (Madrid), trabajan en la determinación estructural de complejos macromoleculares. Marco es en la actualidad profesor de la Universidad de Tour (Francia).

otros muchos ensayos parecidos a los que Anfinsen realizó tres décadas antes: las proteínas se desnaturalizan mediante la urea y se renaturalizan en presencia de GroEL. Este tipo de experimentos mostró que, para un elevado número de proteínas, la presencia de GroEL, en el peor de los casos, acelera el proceso de plegamiento que se produce en ausencia de ella, mientras que en el mejor de los casos resultaba imprescindible para el plegamiento de la proteína.

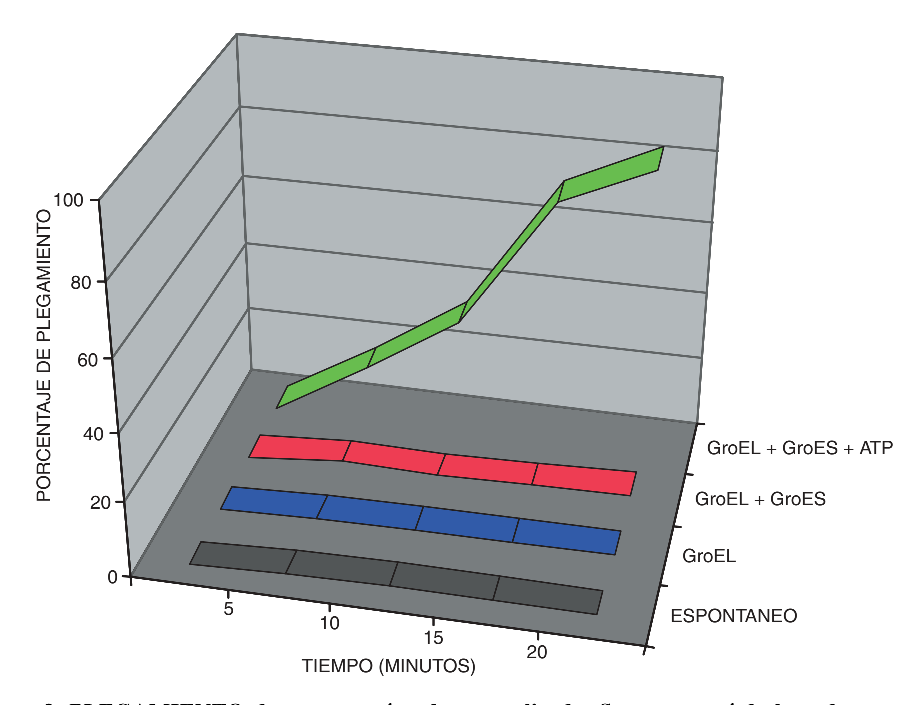
Al mismo tiempo que se descubría la homología entre Rubisco y GroEL, se observó que los anticuerpos generados contra GroEL reaccionan también contra una serie de proteínas de choque térmico y de peso molecular cercano a 60 kilodalton, pertenecientes a mitocondrias de plantas, levaduras y células animales. Esas proteínas intervienen en el plegamiento de proteínas importadas del citosol y presentan, además, una estrecha homología de secuencia con Rubisco y GroEL.

Las chaperoninas ayudan al plegamiento de proteínas, lo mismo en situaciones normales que en condiciones de estrés. Ese fenómeno contrasta con la tendencia observada en muchas proteínas celulares a desnaturalizarse. De ese modo adquirió, a ojos de la ciencia, un significado más amplio la función de las acompañantes moleculares. Pero ni todas las proteínas de estrés térmico son chaperoninas ni todas las chaperoninas son proteínas de estrés térmico; así, mientras GroEL ve aumentada su expresión cuando *E. coli* sufre un choque térmico, las chaperoninas cloroplásticas no se activan con el calor.

La familia de las chaperoninas se cierra por ahora con el descubrimiento de un segundo tipo que se encuentra en arqueobacterias y en el citosol de organismo eucariotas. A ella pertenecen las chaperoninas termofílicas del tipo TF55 (factor termofílico 55, en referencia a su peso molecular) y la eucariótica CCT (chaperonina que contiene el polipéptido TCP-1). Esta subfamilia de chaperoninas muestra una estrecha homología entre sus miembros y una débil aunque significativa homología con las del primer tipo.

Se descubrió que CCT es una chaperonina mientras se buscaban homologías de secuencia de la TF55. Se observó que la proteína TF55 de origen termófilo guarda bastante homología con TCP-1, proteína de función hasta entonces desconocida. Más tarde se conocería que la chaperonina CCT interviene en el plegamiento de la actina y la tubulina. Las chaperoninas extremófilas parecen ejercer una función más inespecífica en el plegamiento de proteínas.

Conviene resaltar una diferencia importante entre chaperoninas del primer y del segundo tipo. Si las del segundo grupo tienden a actuar en solitario, la GroEL y demás chaperoninas del primer grupo actúan en coordinación con una chaperonina de bajo peso molecular (en torno a los 10 kilodalton), a la que se unen en presencia de ATP para formar un complejo estable. Estas proteínas se llaman cochaperoninas, denominándose GroEs a la cochaperonina de GroEL.



3. PLEGAMIENTO de una proteína desnaturalizada. Se trata aquí de la rodanasa, enzima mitocondrial involucrada en la formación y mantenimiento de las proteínas de transporte electrónico que poseen hierro y azufre. Que se lleve a cabo el plegamiento depende de la presencia de las chaperoninas GroEL y GroES y de ATP. La rodanasa desnaturalizada no posee actividad enzimática (A, *línea negra*). Ni la presencia de GroEL (*línea azul*) ni la conjunta de GroEL y GroES (*línea roja*) son capaces de plegar correctamente la rodanasa de manera que vuelva a ser activa; sólo la adición de GroEL, GroES y ATP (*línea verde*) consigue su plegamiento eficaz.

Estructura de las chaperoninas

Podemos reducir a tres las funciones principales de las chaperoninas: impedir la agregación de los polipéptidos parcialmente plegados y liberados de los ribosomas, unirse a péptidos parcialmente plegados aunque atrapados en una conformación tal que no pueden plegarse de manera espontánea y, por fin, proteger a las proteínas de la desnaturalización debida a estrés térmico o facilitar el plegamiento si se ha producido la desnaturalización. Compete, pues, a las chaperoninas generar las condiciones adecuadas para un plegamiento correcto de las proteínas desnaturalizadas.

El porcentaje de proteínas renaturalizadas *in vitro* guarda una relación inversa con la concentración de proteína en el experimento y la temperatura a la que éste se realiza. De ese modo se reduce la probabilidad de interacciones incorrectas. En la célula, sin embargo, la concentración de proteína total es, al menos, dos órdenes de magnitud mayor que en los experimentos de plegamiento *in vitro*, concentración que fomenta el

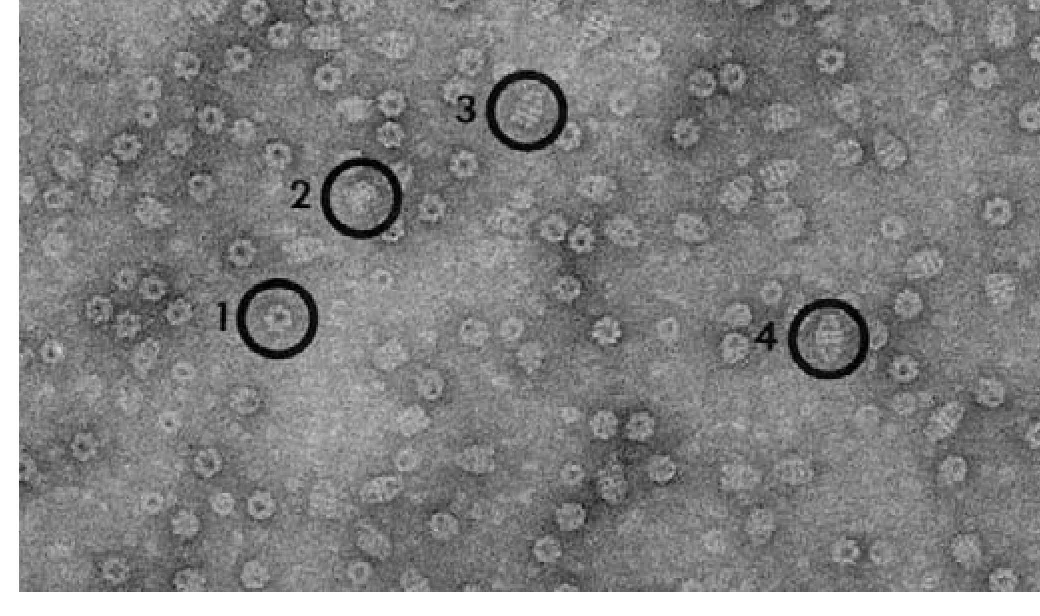
“apelotonamiento molecular” y, por tanto, las interacciones incorrectas.

Nuestro conocimiento de la estructura de las chaperonina ha avanzado con el desentrañamiento de GroEL de *E. coli*, un oligómero constituido por catorce subunidades que, juntadas en sendos heptámeros anulares idénticos, conforman un toroide. Observados al microscopio electrónico de transmisión, los anillos del toroide encierran dos cavidades, conectadas a través de un canal de pequeño grosor. Aunque la morfología de “toroide de doble anillo” es compartida por todas las chaperoninas, las de eubacterias y de orgánulos eucariotas difieren de las chaperoninas de arqueobacterias y del citosol eucariota en su simetría y composición. Las chaperoninas de eubacterias y de orgánulos eucariotas dibujan tetradecámeros compuestos por una o dos subunidades distintas, mientras que las chaperoninas de arqueobacterias y del citosol eucariota forman hexadecámeros u octadecámeros que constan de una o varias (hasta ocho) subunidades distintas.

La cochaperonina GroES complementa la estructura de las cochaperoninas. Está constituida por un heptámero de la proteína del mismo nombre. En presencia de GroEL y de algún nucleótido (ATP, ADP o incluso algún análogo no hidrolizable de ATP), el oligómero se une a GroEL y tapa la cavidad de uno de sus anillos.

La cristalografía de rayos X vino en ayuda de la biología, permitiéndole descifrar la relación entre estructura y función de las chaperoninas. Los grupos de Arthur Horwich y Paul Sigler, de Yale, han sacado a la luz los dominios funcionales de GroEL. En el monómero de GroEL se distinguen tres regiones definidas. Hay un dominio ecuatorial, donde encontramos la mayoría de los aminoácidos responsables de la interacción con las subunidades del mismo anillo y todos los responsables de la interacción con las subunidades del otro anillo. Reside en ese mismo dominio la zona de unión a la molécula de ATP, molécula que es decisiva para el mantenimiento del ciclo de funcionamiento de la chaperonina.

Un segundo dominio, el apical, forma el techo de la cavidad de cada anillo. En la boca de la cavidad se aloja un grupo de aminoácidos hidrófobos, implicados en la unión de GroEL con el sustrato desnaturalizado y con GroES. El tercero, o dominio intermedio, pone en contacto el dominio ecuatorial con el apical y a



4. MUESTRA en la que se han incubado las chaperoninas GroEL y GroES en presencia de ATP. GroEL es un oligómero formado por 14 subunidades de una sola proteína, dispuestas en dos anillos heptaméricos, y con una estructura cilíndrica. Al microscopio electrónico GroEL posee dos tipos de vistas. En una de ellas, la llamada frontal (*estructura 1*), GroEL semeja una rosquilla con una cavidad en el centro de la partícula. En la otra vista, denominada lateral (*estructura 2*), se observan en la partícula cuatro bandas o estrías; cada par de las mismas corresponden a uno de los dos anillos del oligómero. La vista frontal y lateral de GroEL corresponden al cilindro dispuesto de manera vertical y horizontal, respectivamente, sobre la rejilla del microscopio electrónico. GroES es un pequeño heptámero, apenas visible por sí solo en el microscopio electrónico, pero detectable cuando está unido a GroEL. En presencia de nucleótidos de adenina, GroES se une al extremo de uno de los anillos de GroEL en forma de caperuza (*estructura 3*). El complejo GroEL-GroES se denomina asimétrico. En condiciones fisiológicas y en presencia de ATP, un oligómero de GroES se une a cada uno de los anillos de GroEL (*estructura 4*), generando un complejo GroEL-GroES simétrico. El complejo asimétrico y el simétrico forman parte del ciclo de plegamiento de GroEL.

modo de bisagra, permite los grandes movimientos que se producen en el dominio apical durante el ciclo de funcionamiento de la GroEL.

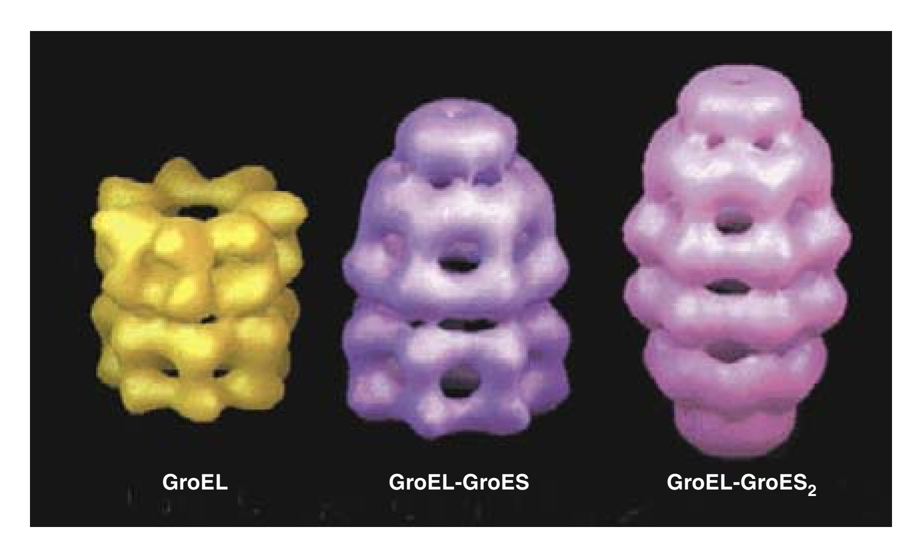
Se ha determinado también la estructura atómica de GroES. Ese nivel de resolución lo ha conseguido el grupo de Johan Deisenhofer en la Universidad de Texas. El heptámero desarrolla una cúpula que, al unirse a GroEL, tapa la cavidad del anillo. La región que interacciona con GroEL está formada por un grupo de residuos hidrofóbicos carentes de estructura secundaria.

Gracias a los trabajos del grupo de Helen Saibil, del Colegio Birbeck de Londres, y el de nuestro laboratorio, conocemos los cambios conformacionales que experimenta la estructura de GroEL cuando interacciona con ATP o con GroES. Dichos cambios estructurales tienen que ver con movimientos del dominio apical con respecto al dominio ecuatorial. La adición de ATP a GroEL genera un movimiento del dominio apical hacia el exterior y hacia arriba, que produce una apertura de la boca del anillo y del volumen de la cavidad. Para que GroES se una a GroEL se necesita, como condición previa, el cambio conformacional inducido por el nucleótido.

La utilización de varios tipos de nucleótidos y de diversas concentraciones de éstos ha permitido observar los numerosos cambios conformacionales que sufren los dos anillos de GroEL y, con ello, una caracterización más completa de los cambios estructurales ligados al ciclo funcional de las chaperoninas.

Estos estudios han permitido mostrar que los dos anillos del toroide no se comportan de igual manera ante la unión de nucleótidos, sustrato y GroES.

La unión entre nucleótidos y GroEL muestra una cooperatividad positiva con el primer anillo y, negativa, con el segundo. Cuando se añade ATP a una solución de GroEL, el nucleótido se une rápidamente a uno de los dos anillos. La unión de ATP a los siete monómeros de un anillo modifica la configuración de éstos de tal manera que el nucleótido no se une con la misma facilidad a los siete monómeros del segundo anillo. Además, la unión



5. RECONSTRUCCION TRIDIMENSIONAL de GroEL y de los distintos complejos formados por GroEL y GroES. Cada uno de los dos anillos de GroEL posee una cavidad a la que se accede por su extremo. Este extremo cambia su morfología cuando se une a él GroES (complejo GroEL-GroES), de tal manera que la cavidad se hace más grande. La unión de GroES a los dos anillos de GroEL para formar el complejo simétrico GroEL-GroES (GroEL-GroES$_2$) promueve el mismo cambio en los dos anillos.

de ATP al segundo anillo genera otra señal hacia el primero, que sirve para mantener el ciclo en funcionamiento. Existe, pues, una intercomunicación entre los dos anillos.

La unión entre el nucleótido ATP y uno de los anillos de GroEL permite el engarce de GroES en GroEL. De esto resulta un complejo asimétrico, porque sólo uno de los dos anillos tiene unido un oligómero de GroES. Durante cierto tiempo se pensó que el complejo GroES-GroEL era la única forma de unión de entrambos. Pero en 1994, y de manera independiente, cuatro grupos, incluido el nuestro, descubrieron que, en presencia de ATP o de AMP-PNP (un análogo no hidrolizable de ATP), GroES se enlaza simultáneamente a los dos anillos de GroEL y forma un complejo simétrico GroEL-GroES. Los complejos simétricos producidos en presencia de ATP son inestables; aparecen y desaparecen continuamente. El nucleótido ATP se hidroliza y se libera de GroEL, lo que posibilita el desarrollo incesante del ciclo.

De la estructura de muchas otras chaperoninas carecemos de información a resolución atómica. Mediante microscopía electrónica y técnicas de procesamiento digital de imagen podemos obtener su estructura a baja-media resolución (20 Å). La comparación de sus secuencias revela que la homología más estrecha se concentra en el dominio de unión a ATP, mientras que la región de mayor variabilidad corresponde al dominio apical. Situación razonable, si consideramos que las chaperoninas comparten seguramente el mecanismo básico de funcionamiento, del que forma parte el dominio de unión a ATP, y difieren en el reconocimiento del sustrato a plegar, en el que tiene un papel primordial el dominio apical.

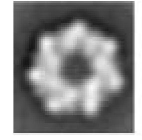
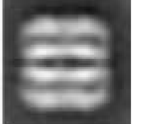
Función de las chaperoninas

El mecanismo plegador de las chaperoninas opera de un modo pasivo. Sostienen algunos que el sus-

CLASIFICACION DE LAS CHAPERONAS

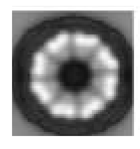
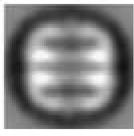
CHAPERONINA	ORGANISMO	LOCALIZACION	SUSTRATO CONOCIDO	HOMOLOGIA CON RESPECTO A: GroEL	TF55	NUMERO DE SUBUNIDADES EN CADA ANILLO	NUMERO DE SUBUNIDADES DIFERENTES	COCHAPERONINA
GRUPO I								
GroEL	EUBACTERIAS	PLASMA	40% DE LAS PROTEINAS SINTETIZADAS	-----	DEBIL	7	1	GroES
mt-cpn60	EUCARIOTAS	MITOCONDRIA	PROTEINAS MITOCONDRIALES IMPORTADAS	50%	DEBIL	7	1	mt-cpn10
RBP	PLANTAS	CLOROPLASTO	SUBUNIDADES DE LA RUBISCO	50 %	DEBIL	7	2	ch-cpn10
GRUPO II								
TF55	ARQUEO-BACTERIAS	PLASMA	LA MAYOR PARTE DE LAS PROTEINAS CELULARES	DEBIL	-----	9	2	NO
TERMOSOMA	ARQUEO-BACTERIAS	PLASMA	LA MAYOR PARTE DE LAS PROTEINAS CELULARES	DEBIL	60%	8	2	NO
CCT	EUCARIOTAS	CITOSOL	ACTINA, TUBULINA	DEBIL	40%	8	8-9	?

CHAPERONINA TIPO I
(GroEL)

VISTA FRONTAL
VISTA LATERAL

CHAPERONINA TIPO II
(CCT)

VISTA FRONTAL
VISTA LATERAL

6. CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES de las chaperoninas de tipo I (*arriba*) y II (*abajo*). Las chaperoninas de tipo I son de origen procariota y simbionte, como las mitocondriales y cloroplásticas; de origen eucariota o procedentes de arqueobacterias, las de tipo II. En presencia de sustrato, éste se introduce en la cavidad de las chaperoninas. A la derecha se pueden observar imágenes promedio de vistas frontales y laterales de los dos tipos de chaperoninas.

trato se pliega dentro de la cavidad de GroEL; ello exige que el sustrato se una primero al dominio apical de GroEL. Pero, en cuanto GroES interacciona con GroEL, el complejo arroja al sustrato dentro de la cavidad del anillo de GroEL. En ese modelo, la cavidad funciona como una caja de Anfinsen en la cual el polipéptido alcanza su conformación natural ("nativa").

Opinan otros que el polipéptido, una vez libre en la cavidad de GroEL, no alcanza allí su conformación natural, sino otra precursora, que es la que presentaría cuando aparece en el exterior. Podría entonces adquirir allí su adecuada conformación en un primer intento; si no lo consigue, se uniría otra vez a GroEL, donde se sometería a un nuevo ciclo de liberación en la cavidad y posteriormente al exterior de ella.

A tenor de los experimentos, las dos hipótesis podrían ser correctas. En razón del sustrato a plegar, operaría un mecanismo u otro. Pero, ¿cuál es el mecanismo por el que la chaperonina reconoce el sustrato desnaturalizado?

Aunque se creyó en un principio que el dominio apical de las chaperoninas reconoce segmentos de estructura secundaria del tipo α-hélice, los ensayos posteriores han demostrado que también se reconoce la estructura de lámina β. Se requiere, en cualquier caso, la presencia, en los polipéptidos desnaturalizados, de zonas con aminoácidos hidrofóbicos expuestos en la superficie. Los residuos aminoacídicos del dominio apical de GroEL involucrados en el reconocimiento del sustrato plegable son también hidrofóbicos. La liberación del sustrato en la cavidad, al forjarse el complejo GroES-GroEL, podría hacer que los residuos hidrofóbicos del polipéptido, libres del riesgo de interaccionar con los de otros polipéptidos, se convirtiesen en factor de nucleación alrededor del cual comenzase su plegamiento.

En el plegamiento, el sustrato desnaturalizado se une al dominio apical; GroES se engarza en éste y lo desplaza hacia la cavidad. Allí lo suelta. Pero, ¿en virtud de qué mecanismo se deshace GroES del sustrato? ¿Cuál es el motor del ciclo de plegamiento? La respuesta está en la hidrólisis de ATP y en los consiguientes cambios conformacionales y señales entre los anillos que genera el nucleótido.

La energía liberada en la hidrólisis de ATP no se transmite al sustrato renaturalizable, sino que se utiliza para mantener un ciclo de cambios conformacionales concertados entre los dos anillos. En 1994, el grupo de Arthur Horwich, en Yale, indujo numerosas mutaciones en los aminoácidos del dominio ecuatorial involucrados en la interacción entre los anillos. Y produjo un oligómero de GroEL formado por un solo anillo. Este anillo, capacitado para unir nucleótidos, sustrato y GroES, se muestra incapaz de liberar este último y, por tanto, tampoco el sustrato. Aunque los monómeros del anillo hidrolizan el ATP, no se libera la GroES. Ahora bien, en cuanto se desprende la cochaperonina, el sustrato aparece correctamente plegado.

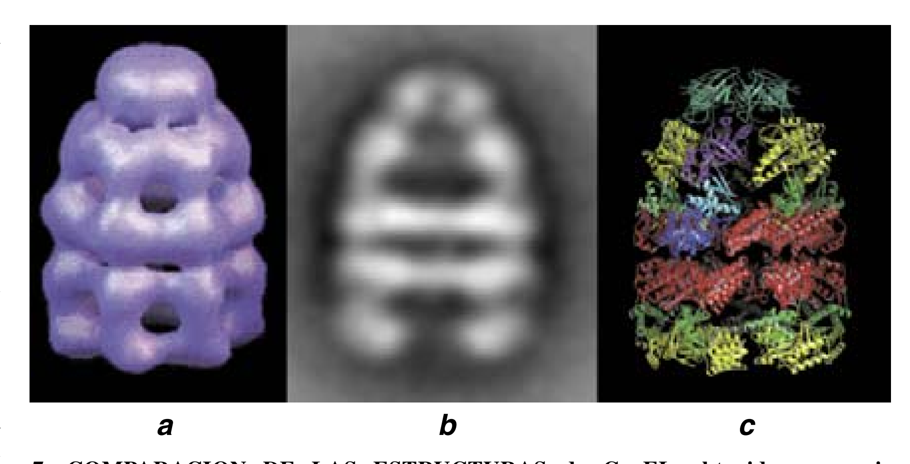
Cada anillo de GroEL constituye una unidad funcional de plegamiento. Sin embargo, para que el oligómero de GroES se libere, se requiere una señal procedente del otro anillo. De ello se desprende que ambos anillos deben de operar de común acuerdo.

La chaperonina GroEL persiste asimétrica a lo largo de todo el ciclo. No se trata sólo de una asimetría estructural (los dos anillos tienen distinta estructura en todo momento), sino también funcional: en cada momento del ciclo, difiere la afinidad de cada anillo por el ATP o por el sustrato.

Para hacernos una idea general del comportamiento de la GroEL, GroES y el sustrato, imaginémonos un oligómero de la chaperonina GroEL en ausencia de nucleótidos (situación que no ocurre *in vivo*). El polipéptido desnaturalizado reconoce el dominio apical de uno de los dos anillos y se une a él; y aunque puede enlazarse también con GroEL en presencia de nucleótidos, posee más afinidad hacia GroEL en ausencia de éstos.

El ATP se inserta en el sitio de unión de cada monómero de un anillo. La unión y posterior hidrólisis del ATP genera dos señales. Una se dirige al dominio apical, que sufre un movimiento hacia fuera y hacia arriba al pivotar sobre la bisagra formada por el dominio intermedio. Gracias a esa modificación estérica, puede engarzarse un oligómero de GroES y producirse un mayor movimiento del dominio apical hacia arriba. La unión de GroES desplaza al polipéptido hacia el interior de la cavidad; allí lo suelta. La segunda señal se transfiere, a través del dominio ecuatorial, al otro anillo. La unión de GroES a este segundo anillo forma un complejo simétrico, que puede mantener encerrado un polipéptido en cada cavidad.

El complejo así constituido, muy inestable, no tarda en desaparecer. La unión del ATP en el segundo anillo envía una señal al primero para que el oligómero de GroES se libere, con lo cual el polipéptido puede salir al medio, ya sea plegado en su conformación nativa o bien dispuesto a alcanzarla en el exterior. Este anillo, tras soltar luego el ADP y el fosfato inorgánico producto de la hidrólisis de



7. COMPARACION DE LAS ESTRUCTURAS de GroEL obtenidas por microscopía electrónica y difracción de rayos X en la que se observa cómo las dos técnicas, cada una a su nivel de resolución, reflejan los mismos detalles estructurales. En (*a*) se presenta la reconstrucción tridimensional de un complejo asimétrico GroEL-GroES obtenida por microscopía electrónica y procesamiento de imágenes, mientras que en (*b*) se muestra la proyección de toda la masa del mismo complejo. En (*c*) se observan las estructuras de los monómeros de GroEL y GroES obtenidas mediante difracción de rayos X. En los tres casos, la cochaperonina GroES se visualiza como el disco que tapa la cavidad superior del oligómero de GroEL.

ATP, se halla listo para unir otra vez sustrato, ATP y GroES y continuar así el ciclo funcional.

En ninguna fase del ciclo coinciden los anillos. Mientras uno atrapa al polipéptido desnaturalizado, el otro ya lo ha liberado en su cavidad. GroEL funciona como un motor de dos cilindros en el que el combustible es el ATP y su movimiento se produce por la hidrólisis del nucleótido.

También en la chaperonina mitocondrial y cloroplástica rige, así parece, el mecanismo de funcionamiento descrito. Distinto pudiera ser el caso de la chaperonina CCT, dada su especificidad para con la actina y la tubulina. Hemos observado en nuestro laboratorio que, en una suerte de mecanismo de plegamiento parecido a GroEL, la chaperonina CCT atrapa la actina desnaturalizada, que se instala en la cavidad central de la chaperonina. La unión de ATP a las subunidades del anillo a la que la actina se ha unido genera un cambio conformacional en la chaperonina que permite el plegamiento de la actina. En este caso, y a diferencia de GroEL, ciertas subunidades pudieran tener un papel específico en el ciclo de plegamiento.

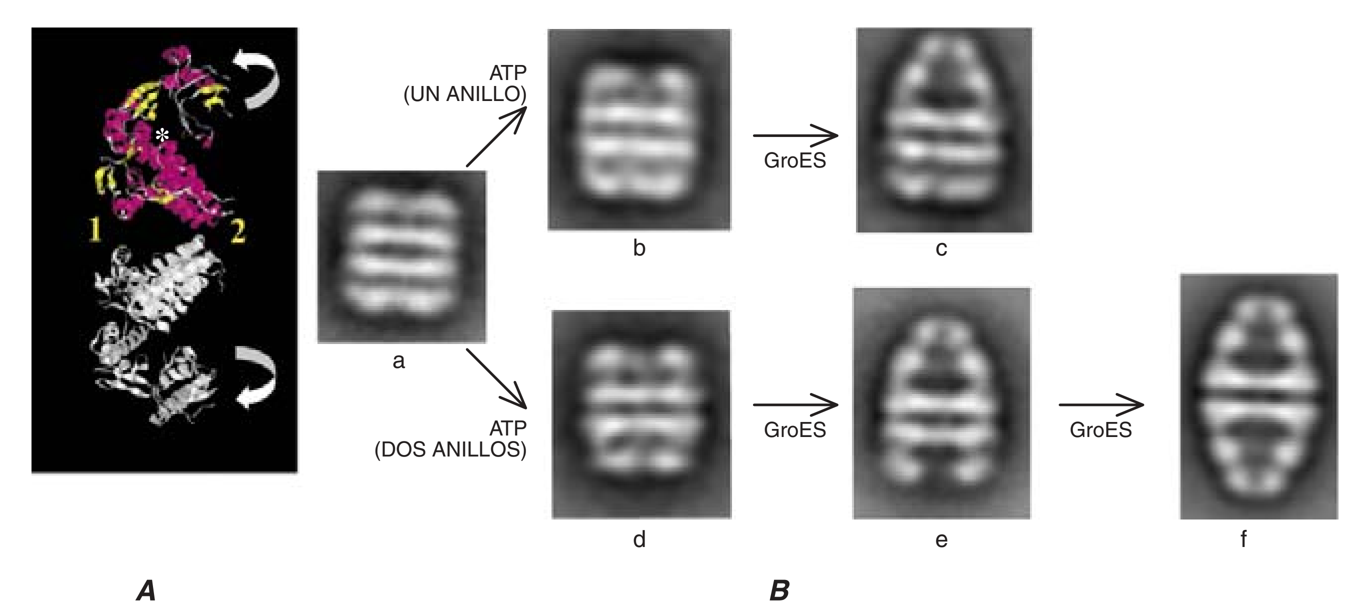
Quedan varios aspectos por resolver. De entrada, el tamaño de la cavidad de los anillos de las chaperoninas. En GroEL y otras chaperoninas la hendidura admite proteínas de hasta 55 kilodalton de peso molecular, más o menos desplegadas. Pero, ¿qué ocurre con proteínas de mayor tamaño? Se ignora también la cantidad de sustrato que en un momento determinado puede plegar la población de GroEL de una célula. Se ha sugerido que GroEL, *in vivo*, sólo puede plegar el 10 % de las proteínas que requieren de ayuda en tal menester. ¿Quién pliega el 90 % restante de proteínas?

Mecanismos de defensa celulares

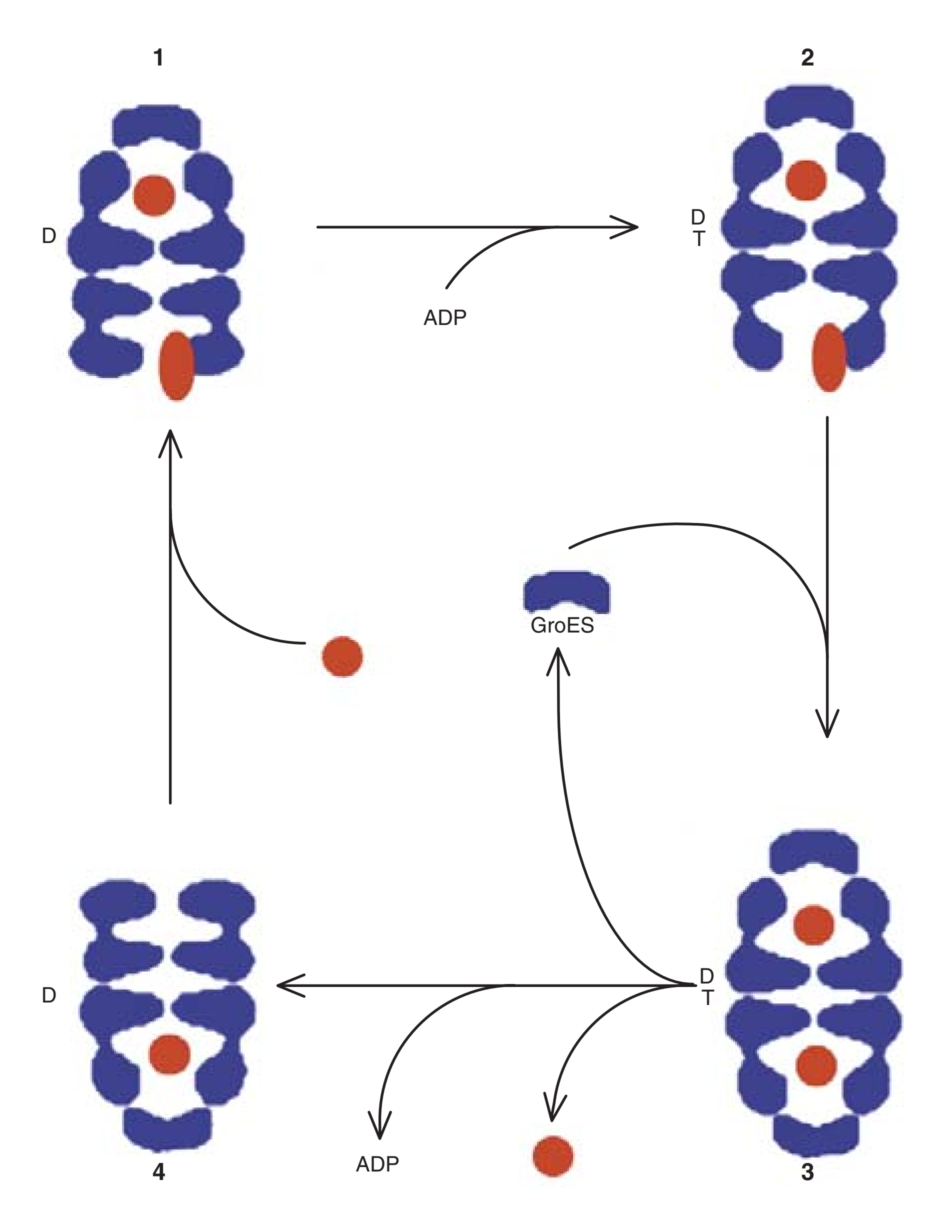
Las chaperoninas protegen, pues, la función y la estructura de las células a través de la protección de sus componentes. Pero su misión no acaba aquí. En mamíferos, las chaperoninas podrían defender de las infecciones mediante el envío de señales al sistema inmunitario, del que son uno de los más potentes estimuladores. La estimulación procede en dos frentes; en un primer nivel, las chaperoninas activan los mecanismos innatos de defensa, puestos en operación por los fagocitos. En un segundo frente, las chaperoninas actúan sobre los mecanismos de defensa adquiridos, mediante la estimulación de la producción de anticuerpos y linfocitos *T*.

En ese mismo marco de la defensa, las chaperoninas se relacionan con los factores de crecimiento en los mamíferos. El factor temprano de la gestación ("Early-pregnancy factor"), que aparece en el suero materno a las pocas horas de la fecundación, interviene en la proliferación celular, posee propiedades inmunosupresoras y regula el crecimiento de todo tipo de células, normales o neoplásicas. Además, su acumulación en las plaquetas denuncia su participación en los procesos de cierre de heridas. Se ha sugerido también su implicación en los mecanismos de inflamación.

El factor temprano de la gestación, con tan numerosas propiedades biológicas, ha resultado ser la cochaperonina mitocondrial mt-cpn10, ayudante de la chaperonina mitocondrial en el plegamiento de proteínas. Del estudio del papel de las chaperoninas en los mecanismos de defensa celular podrían generarse



8. CAMBIOS CONFORMACIONALES que sufre GroEL durante el ciclo de plegamiento. Compárense las imágenes que se muestran en (*B*), obtenidas por microscopía electrónica y procesamiento de imágenes, con la estructura de los dos monómeros de GroEL mostrados en (*A*), obtenida por difracción de rayos X. Cada monómero pertenece a un anillo del oligómero de GroEL. Los cambios conformacionales se generan por la unión de ATP al sitio de unión de ATP (*) de los siete monómeros de un anillo a la vez. La señal se transmite desde (*) en dos direcciones: una hacia al dominio apical a través del dominio intermedio; la otra va hacia el monómero del otro anillo con el que está interaccionando, a través de los puntos de contacto 1 y 2. De esta manera, los cambio conformacionales que se producen en un anillo afectan al otro, por lo que ambos anillos actúan de manera concertada. Si partimos de un oligómero de GroEL que no tiene nucleótido (*a*), la unión de ATP a uno de los anillos genera un cambio conformacional de éste (*b*). La unión de GroES a los dominios apicales de este anillo genera un movimiento de los dominios apicales del anillo aún mayor (*c*), con la consiguiente apertura de la cavidad del anillo. Si se añade al oligómero de GroEL una cantidad mayor de ATP, se produce un cambio conformacional de los dominios apicales de ambos (*d*). La adición de GroES produce primero un complejo asimétrico GroEL-GroES (*e*) y luego un complejo simétrico (*f*).



9. EL CICLO de plegamiento de GroEL podría ser muy parecido a éste. Una molécula de proteína desnaturalizada se une a los dominios apicales de un anillo de GroEL (*anillo de abajo en 1*). El oligómero está representado por un complejo asimétrico, en el que en el anillo de arriba hay una molécula desnaturalizada protegida por un oligómero de GroES. Este anillo ha hidrolizado su ATP de tal manera que ahora posee moléculas de ADP (*D*) en todos sus monómeros. La unión de ATP (*T*) al primer anillo genera un cambio conformacional en éste (*2*) y así puede unir un oligómero de GroES, creándose un complejo simétrico (*3*). La unión de ATP en el segundo anillo induce la liberación, en el primero, del oligómero de GroES, de la proteína cautiva en la cavidad y del ADP unido a los monómeros de GroEL (*4*). La proteína liberada puede hacerlo en forma nativa o generar esta conformación en el exterior. Si ninguna de las posibilidades se produjese, la proteína podría asociarse otra vez a GroEL, y el ciclo se itera.

en el futuro aplicaciones médicas de este tipo de proteínas.

Aspectos biotecnológicos de las chaperoninas

La producción industrial de proteínas constituye un fenómeno en expansión creciente. El sector alimentario y el farmacéutico promueven la expresión de proteínas en organismos diferentes de los que se encuentran en la naturaleza, por lo común, bacterias, levaduras o células eucarióticas. Se consigue este resultado mediante la introducción del gen que cifra la proteína deseada en el organismo huésped.

Sin embargo, este procedimiento no se halla exento de problemas, siendo el más espinoso la falta de reconocimiento por parte del organismo de la proteína que está expresando, lo que da lugar a los cuerpos de inclusión. Así se llaman los agregados de proteína, insolubles, aunque en algunos casos se solubilizan con urea u otros agentes desnaturalizantes.

Pero la técnica de la solubilización no es ni barata, ni rápida ni siempre segura. En muchos casos, el problema de la insolubilidad de la proteína sobreexpresada se ataja con el aumento de chaperoninas nativas o la expresión contemporánea de chaperoninas nativas y foráneas.

De interés biotecnológico es la generación de chaperoninas híbridas, dotadas con propiedades de las progenitoras; por ejemplo, chaperoninas construidas con la eficacia e inespecificidad plegadora de la GroEL de *E. coli* y la estabilidad de una chaperonina proveniente de un organismo extremófilo.

En el estudio del plegamiento de proteínas acaban de hacer su entrada las minichaperonas. El grupo de Alan Fersht, de la Universidad de Cambridge, ha conseguido, mediante la eliminación del dominio ecuatorial y el intermedio, generar un monómero estable de GroEL en el que sólo se encuentra el dominio apical; en este dominio se mantiene intacta la zona de interacción con el polipéptido desnaturalizado. La minichaperona posee capacidad para plegar proteínas (no todas) sin necesidad de hidrólisis de ATP. El grupo de Fersht, tras unir la minichaperona a una resina de cromatografía, ha renaturalizado las proteínas mediante el paso de éstas por una columna empaquetada con el complejo resina-minichaperona.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PROTEIN FOLDING IN THE CELL: THE ROLE OF MOLECULAR CHAPERONES HSP70 AND HSP60. F. U. Hartl, J. Martin y W. Neupert en *Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure*, vol. 21, páginas 293-322, 1991.

PROTEIN FOLDING IN THE CELL. M. J. Gething y J. Sambrook en *Nature*, vol. 355, páginas 33-45, 1992.

THE CHAPERONINS. Dirigido por R. J. Ellis. Academic Press, 1996.

GROEL-MEDIATED PROTEIN FOLDING. W. A. Fenton y A. L. Horwich en *Protein Science*, vol. 6, páginas 743-760, 1997.

Un nuevo maglev

El modelo Inductrack promete ser un sistema más seguro y económico para trenes de levitación magnética. Su base técnica permite aplicarlo al lanzamiento de cohetes

Richard F. Post



El cuento del "Príncipe Ahmed y el Hada" nos relata en las *Mil y una noches* el vuelo de aquél sobre una alfombra mágica, sustentada por fuerzas invisibles. La versión moderna de la alfombra es un tren levitado por fuerzas magnéticas. El *maglev*, así se llama, podría desplazarse más deprisa y con mejor rendimiento que los trenes porque no se apoya en raíles de acero, sino en el aire. La idea nació a finales de los sesenta. Gordon T. Danby y James R. Powell, del Laboratorio Nacional de Brookhaven, propusieron utilizar bobinas superconductoras para producir los campos magnéticos que levitarían los trenes. Durante las décadas siguientes se construyeron maglevs para demostraciones en Alemania y Japón. Mas, pese al atractivo de una técnica que promete viajes suaves como la seda a velocidades de hasta 500 kilómetros por hora, todavía no se ha construido ningún sistema maglev a plena escala para explotación comercial.

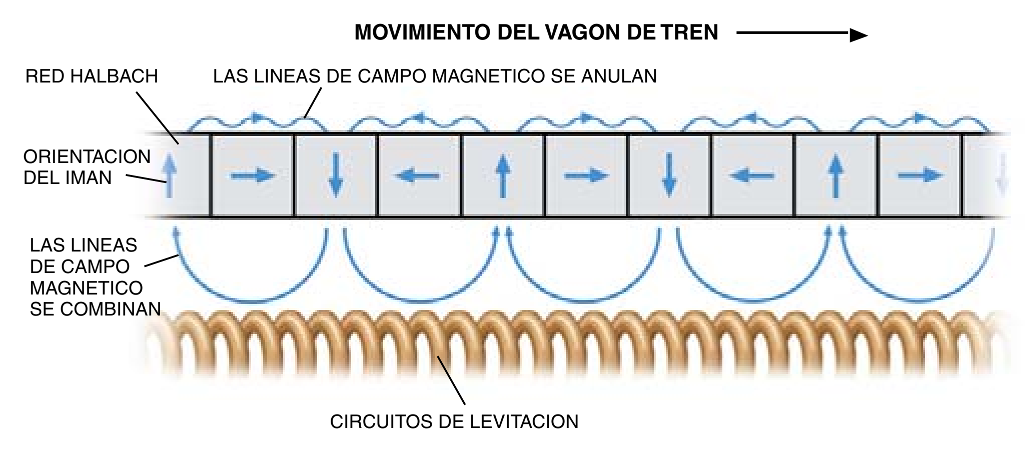
Por varias razones. De entrada, los maglev probados hasta la fecha son mucho más caros y complejos que los ferrocarriles. El sistema japonés, por ejemplo, requiere instalar en los vagones un equipo criogénico muy costoso para enfriar las bobinas superconductoras; para funcionar correctamente, han de permanecer éstas a temperaturas inferiores a cinco kelvin. El maglev alemán utiliza electroimanes clásicos, no superconductores; ahora bien, al no fundarse en la repulsión, sino en la atracción magnética, el sistema resulta en sí mismo inestable. Cada vagón del tren debe entonces incorporar sensores y circuitos de realimentación para mantener la separación entre los electroimanes del vagón y la vía. Además, ninguno de los dos sistemas es inmune al fallo. Basta cualquier interrupción de los circuitos de control de los imanes o de los sistemas de potencia para provocar una repentina pérdida de levitación con el tren en marcha. Aunque podemos reducir al mínimo los riesgos de un fallo de este tipo, siempre supondrá un nuevo aumento del coste y la complejidad.

A bordo del Inductrack

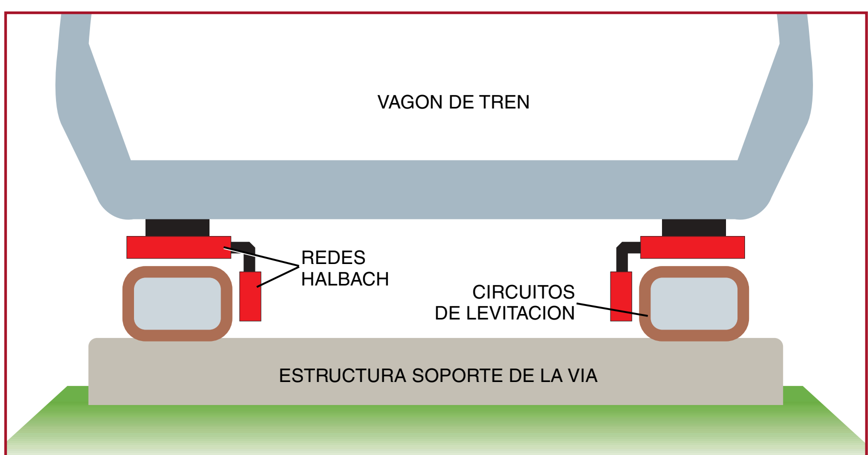
En el Laboratorio Nacional Lawrence de Livermore investigamos una nueva forma de conseguir la levitación magnética, que se nos antoja más simple y económica. La idea surgió de trabajos precedentes sobre baterías electromecánicas de coches y camiones. Tales baterías almacenan energía cinética por medio de volantes de inercia, que requieren rodamientos magnéticos casi exentos de rozamiento para que las pérdidas de energía sean mínimas. Los rodamientos desarrollados en Livermore utilizaban redes de imanes cilíndricas para estabilizar la levitación de la rueda volante. Pronto caímos en la cuenta de que nuestros estabilizadores, desplegados, podrían tomarse como base de un nuevo tipo de maglev.



1. EL SISTEMA MAGLEV INDUCTRACK puede ofrecer trenes que corran a 500 kilómetros por hora. En esta nueva técnica, unas redes de imanes permanentes situadas bajo los vagones, le harán levitar unos pocos centímetros sobre las vías. Se pretende que el sistema resulte más económico y seguro que los maglev de electroimanes o bobinas superconductoras.



2. LOS IMANES permanentes instalados en la panza de los vagones de un tren Inductrack están dispuestos en una red de tipo Halbach (*izquierda*); las líneas de campo magnético se refuerzan entre sí por debajo de la red y se anulan mutuamente por encima de la misma. Al moverse, los imanes inducen corrientes en los circuitos del carril; se produce así un campo electromagnético que repele a la red y hace levitar el vagón sobre la vía. Puede conseguirse la estabilidad lateral mediante redes Halbach desplegadas en los costados de los circuitos del carril (*abajo*).



El nuevo sistema, llamado Inductrack (de *inductive track*, carril inductor), es pasivo, pues no utiliza imanes superconductores ni electroimanes excitados. En su lugar, emplea imanes permanentes a temperatura ambiente, similares a las barras imantadas, aunque más potentes. En la panza del vagón se instala una red rectangular plana de barras magnéticas, llamada red Halbach en honor de su inventor Klaus Halbach. Las barras adoptan una disposición especial: la orientación de cada barra forma ángulos rectos con las orientaciones de las barras adyacentes. Con esta configuración de las barras, las líneas del campo magnético se combinan bajo la red y producen un campo muy intenso, mientras que por encima de la red las líneas de campo se anulan mutuamente.

El segundo elemento decisivo es la vía, cuyos carriles van embutidos en bobinas de hilo conductor aislado, muy juntas. Cada bobina constituye un circuito cerrado, parecido a un marco de ventana rectangular. El Inductrack crea la fuerza de levitación por inducción de corrientes eléctricas en los carriles de la vía. Al mover un imán permanente en la proximidad de una espira de hilo conductor se crea una corriente en ese hilo, según descubriera Michael Faraday en 1831. Cuando avanzan los vagones del tren Inductrack, los imanes de las redes Halbach inducen corrientes en las bobinas de los carriles, y éstas a su vez generan un campo electromagnético que repele a las redes. Mientras el tren se desplace a velocidades superiores a un umbral crítico de unos pocos kilómetros por hora, las redes Halbach levitarán a escasos centímetros sobre la superficie del carril.

El campo magnético actúa de modo muy parecido a un muelle comprimido: la fuerza de levitación aumenta exponencialmente al disminuir la separación entre la vía y el vagón. En esta propiedad reside la estabilidad intrínseca del Inductrack, capaz de acomodarse a incrementos de carga o a las fuerzas de aceleración que imprime el paso por las curvas del trazado férreo. El sistema no necesitará, pues, circuitos de control para mantener la levitación de los vagones, sino únicamente generadores de potencia propulsora que aceleren el tren.

Antaño no se creía factible el uso de imanes permanentes en sistemas maglev porque darían una fuerza levitadora demasiado débil en relación con su peso. Sin embargo, la combinación de redes Halbach y bobinas muy apiñadas en el carril origina un empuje levitador próximo al límite máximo teórico de la fuerza por unidad de superficie creada por un imán permanente. Los cálculos demuestran que el uso de aleaciones de intenso campo magnético —por ejemplo, la de neodimio-hierro-boro— proporciona fuerzas de levitación del orden de 40 toneladas por metro cuadrado utilizando redes de imanes que no pesan más de 800 kilogramos por metro cuadrado, es decir, la cincuentava parte del peso levitado.

En un sistema Inductrack real, la vía férrea consistiría en dos filas de bobinas rectangulares y apiladas, que corresponden respectivamente a los dos raíles de acero de la vía. Las principales redes Halbach (levitadoras) se situarían en la panza (bajo el fondo del vagón), de tal manera que se desplazarían sobre las filas de bobinas. Podrían desplegarse otras redes Halbach de menor superficie a lo largo de los costados de las filas de bobinas con el fin de asegurar la estabilidad lateral del vagón. Esta configuración recordaría la de un tren, es decir, una rueda de pestaña que corre sobre un raíl de acero. En el Inductrack, las redes Halbach laterales desempeñan una función "pestañas", mientras que las "ruedas" son sustituidas por las redes levitadoras.

El rendimiento

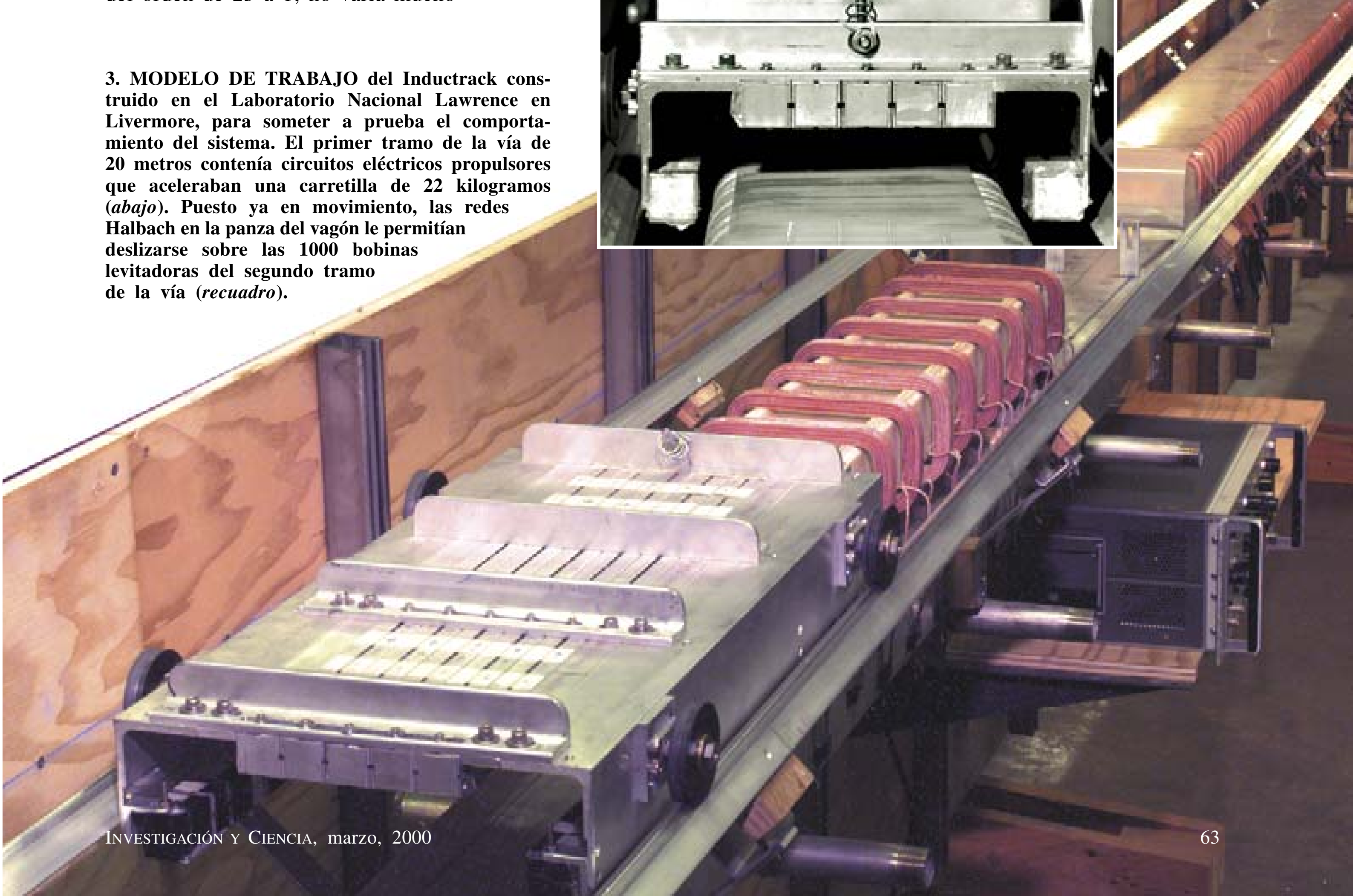
El rendimiento del sistema levitador reviste capital interés en cualquier tipo de maglev. A diferencia de los modelos alemán y japonés, el Inductrack no requiere potencia alguna para crear su campo magnético, puesto

que utiliza imanes permanentes. Por tanto, no hay que considerar esta posible pérdida de rendimiento. En cambio hay que inducir corrientes en los circuitos de la vía, y la resistencia eléctrica de estos circuitos forzosamente disipará en calor una parte de la potencia. Pérdida de potencia que, por provenir del movimiento del tren con respecto a la vía, dará lugar a fuerzas que se oponen al avance. Estas fuerzas son comparables en el ámbito magnético a la resistencia por rozamiento que crean las ruedas y rodamientos de los trenes. En el Inductrack, las fuerzas de rozamiento magnético varían en sentido inverso a la velocidad del tren, adquiriendo valores muy bajos a las velocidades típicas del maglev (250 a 500 kilómetros por hora). Estas fuerzas de resistencia al avance se comportan, pues, al revés que las fuerzas de rozamiento de las ruedas o de resistencia aerodinámica, que aumentan ambas al crecer la velocidad.

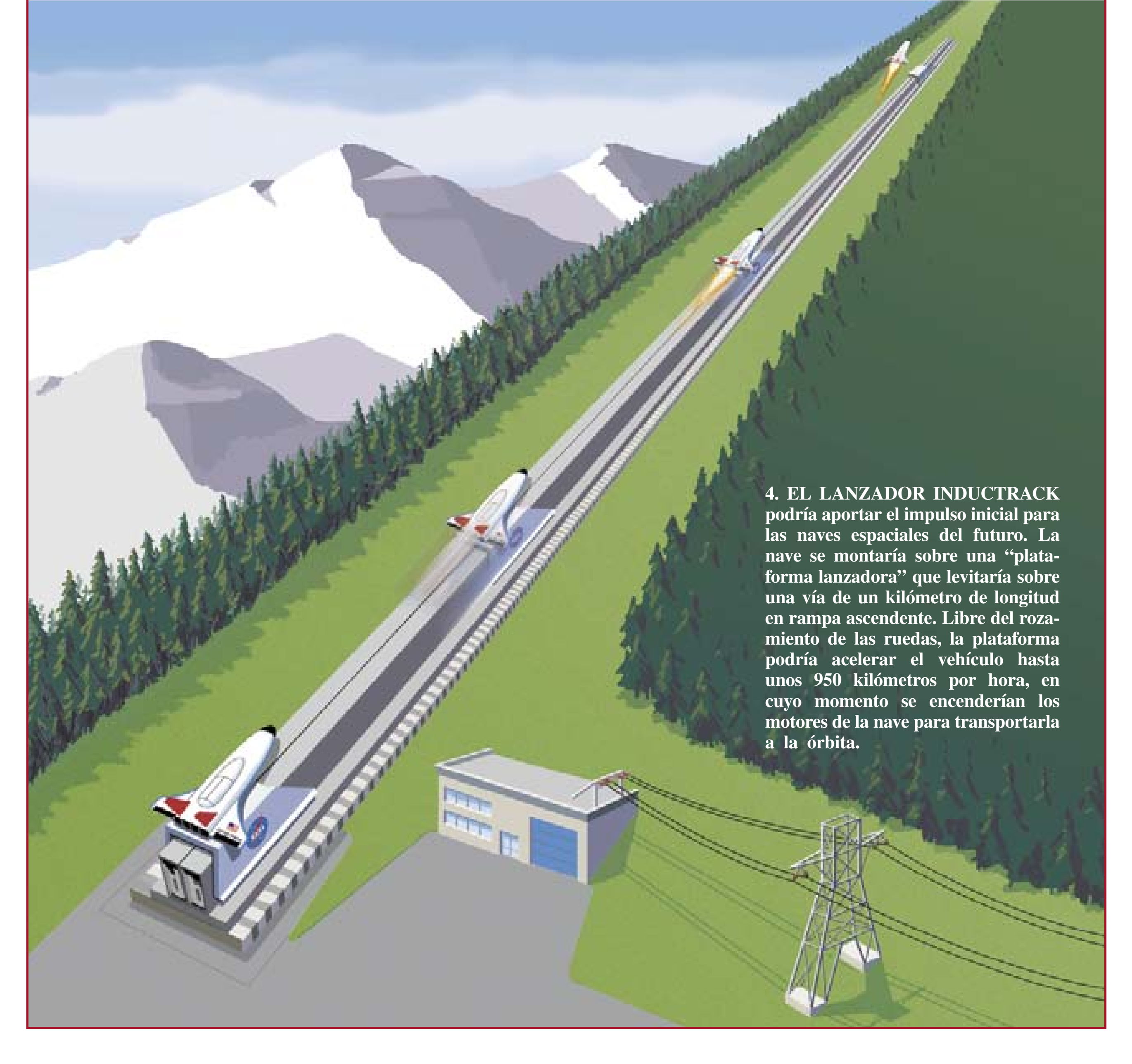
En aeronaves es corriente evaluar el comportamiento del perfil aerodinámico por la relación que existe entre la potencia de sustentación y la resistencia al avance (relación *lift-to-drag*, L/D). A velocidades de vuelo típicas, la relación L/D del ala de un avión de propulsión a chorro es del orden de 25 a 1; no varía mucho con la velocidad. En el sistema Inductrack, la relación correspondiente liga la sustentación magnética —la fuerza levitadora— con el rozamiento magnético. Tras un minucioso análisis teórico del sistema obtuvimos una fórmula válida para la relación L/D del Inductrack. En esta labor colaboró eficazmente Dmitri D. Ryutov, reputada autoridad en teoría de fusión por confinamiento magnético de plasmas, quien ha aplicado técnicas procedentes de esa disciplina al análisis del Inductrack.

Según pudimos observar, la relación L/D del Inductrack es directamente proporcional a la velocidad con que se mueven las redes Halbach. Con el tren parado, no existe fuerza levitadora y la relación L/D es cero. Mas, en cuanto empieza a moverse, la fuerza de levitación crece rápidamente, alcanzando la mitad de su valor máximo a una velocidad comprendida entre dos y cinco kilómetros por hora. A esta velocidad de transición se igualan la sustentación magnética y el rozamiento magnético. A velocidad doble de la de transición, la fuerza levitadora alcanza el 80 por ciento de su valor máximo, y la relación L/D crece hasta alrededor de cinco. Vemos, pues, que el tren levita ya a velocidades muy bajas. Equipando los vagones con ruedas auxiliares, el tren correrá sobre los raíles hasta llegar a la velocidad de transición; entonces, comenzará a levitar. El rendimiento del sistema seguirá mejorando a medida que el tren gane velocidad: a 500 kilómetros por hora la relación L/D puede crecer hasta valores de 200. Si por cualquier causa fallara la potencia propulsora, los vagones del tren seguirían levitados mientras el tren se iría desacelerando hasta una velocidad muy baja, en la cual los vagones pasarían a descansar sobre las ruedas auxiliares.

Otra manera de evaluar el rendimiento del sistema de levitación magnética Inductrack consiste en medir la potencia perdida por rozamiento magnético y compararla con otras pérdidas de potencia. Un vagón de tren de 50.000 kilogramos lanzado a 500 kilómetros por hora disiparía de 300 a 600 kilowatt de potencia



3. MODELO DE TRABAJO del Inductrack construido en el Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, para someter a prueba el comportamiento del sistema. El primer tramo de la vía de 20 metros contenía circuitos eléctricos propulsores que aceleraban una carretilla de 22 kilogramos (*abajo*). Puesto ya en movimiento, las redes Halbach en la panza del vagón le permitían deslizarse sobre las 1000 bobinas levitadoras del segundo tramo de la vía (*recuadro*).



4. EL LANZADOR INDUCTRACK podría aportar el impulso inicial para las naves espaciales del futuro. La nave se montaría sobre una "plataforma lanzadora" que levitaría sobre una vía de un kilómetro de longitud en rampa ascendente. Libre del rozamiento de las ruedas, la plataforma podría acelerar el vehículo hasta unos 950 kilómetros por hora, en cuyo momento se encenderían los motores de la nave para transportarla a la órbita.

en los circuitos de levitación de la vía férrea. Por contra, la resistencia al avance o rozamiento de origen magnético produciría a esa velocidad una pérdida de potencia de casi 10 megawatt. En otras palabras, la potencia necesaria para mantener el tren en levitación es menos de la décima parte de la que se requiere para vencer la resistencia del viento.

Sistemas de propulsión para Inductrack

Hasta ahora nos hemos ceñido a un tipo de circuito Inductrack, el formado por una fila de bobinas rectangulares. Hay muchas otras maneras de equipar el carril, según las prestaciones deseadas. Podría constar, por ejemplo, de columnas de finas láminas de aluminio intercaladas por películas aislantes. Cuando las redes Halbach se movieran sobre esas columnas, los campos magnéticos creados inducirían corrientes eléctricas en las láminas de aluminio. En cada hoja se grabaría una serie de ranuras paralelas para dar un camino óptimo a los electrones, reduciendo al mínimo las pérdidas de potencia por corrientes parásitas. Este tipo de vía ejercería una fuerza levitadora mayor que la fila de bobinas rectangulares y su fabricación podría ser menos costosa.

Otra alternativa sería incrementar la eficacia del carril por el método de carga inductiva. Podría aplicarse a los circuitos rectangulares sin más que recubrir con placas de ferrita —cerámica magnética que contiene óxido férrico— la sección inferior de cada bobina. Esta modificación disminuiría la corriente inducida en las bobinas por las redes Halbach y, por tanto, se perdería menos potencia en la resistencia eléctrica. Al ser menor el rozamiento magnético, la sustentación lo podría superar con más facilidad y el tren iniciaría la levitación a una velocidad de transición menor. Pero la carga inductiva ha de pagar un precio: la fuerza levitadora máxima del sistema se reducirá por debajo de las 40 toneladas por metro cuadrado que se logran con el tipo de carril más sencillo.

Entre los méritos del Inductrack figura la capacidad de acomodarse a diferentes sistemas de propulsión de trenes. Si la vía férrea pudiera acoplarse a una red de distribución de energía eléctrica, los trenes podrían ser movidos por "bobinas propulsoras" insertadas entre los circuitos de levitación del carril. Estas bobinas se alimentarían mediante corriente de la red y generarían campos electromagnéticos que interactuarían con los campos creados por las redes Halbach. Excitando las bobinas propulsoras en sincronía con el movimiento del tren,

RICHARD F. POST, adscrito a la división de energía del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, es profesor emérito de la Universidad de California en Davis. Ha consagrado cuarenta años a la investigación de la fusión controlada. Agradece las contribuciones de J. Ray Smith y de William H. Kent a la construcción y operación del modelo Inductrack, así como la de Louann S. Tung para el prototipo de la NASA.

se crearían fuerzas que aceleraran o desaceleraran los vagones. En los casos en que fuera muy costoso electrificar la línea férrea —por ejemplo, en largas travesías entre ciudades distantes— el tren maglev podría equiparse con una hélice recubierta, accionada por una turbina de gas. Dado que la única fuerza apreciable que frenaría el tren sería la resistencia del viento, bastaría una sola hélice para acelerar el maglev hasta altas velocidades.

Tras completar los análisis teóricos sobre el Inductrack, nuestro grupo acometió la siguiente etapa, a saber, construir un prototipo del sistema en funcionamiento. Con ello se pretendía comprobar las predicciones de la teoría y demostrar que la levitación era estable. La vía de prueba de 20 metros de longitud tenía que levitar una carretilla de 22 kilogramos equipada con redes Halbach en la panza. La primera parte de la vía contenía circuitos propulsores alimentados eléctricamente; la segunda estaba formada por 1000 bobinas levitadoras rectangulares delgadas, cada una de unos 15 centímetros de anchura.

En cada recorrido de prueba, la carretilla empezaba apoyada en sus ruedas auxiliares y pasaba sobre los circuitos propulsores, que la aceleraban hasta una velocidad de 12 metros por segundo, suficiente para hacerla levitar sobre las bobinas rectangulares (la velocidad de transición era de cuatro metros por segundo). La carretilla levitaba en casi todo el tramo de vía y, finalmente, volvía a descansar sobre las ruedas en el extremo opuesto. Para medir la velocidad del móvil y sus oscilaciones, recurrimos a dos láseres de tipo puntero que iban montados sobre la carretilla, formando cierto ángulo entre sí. Una videocámara registraba las evoluciones de la traza luminosa de los láseres sobre una pantalla blanca colocada al final de la vía, con lo que podía representarse gráficamente la posición de la carretilla y sus movimientos de cabeceo y guiñada.

La prueba ratificó nuestras predicciones sobre el comportamiento del Inductrack. Demostró que la idea era realizable. Y, por si fuera poco, un estudio preliminar de viabilidad dirigido en 1997 por la sociedad consultora Booz-Allen y Hamilton reveló que un sistema Inductrack a escala real sería menos costoso de construir y explotar que el maglev de Alemania. En particular, el estudio estimaba que un vagón de tren equipado con redes Halbach costaría entre 510 y 670 millones de pesetas, mientras que el vagón del maglev alemán rozaría los 1000 millones. (Se desconoce el coste por vagón del maglev japonés.) El coste del vehículo Inductrack supera al de un vagón de ferrocarril medio (evaluado entre 300 y 480 millones de pesetas); la construcción de la vía del sistema puede costar hasta un 80 por ciento más que la de una vía de ferrocarril normal. Sin embargo, el estudio señalaba que los costes de utilización de energía y de mantenimiento del Inductrack serían notablemente inferiores a los del ferrocarril.

¿Lanzamiento de cohetes?

A raíz de la construcción de la vía de ensayo en Livermore, nuestro trabajo llegó a los oídos de la NASA. La agencia espacial suscribió un contrato con el laboratorio para construir otro modelo, adaptado a una aplicación muy diferente del destino original. Los estudios de la NASA han demostrado que, si fuera posible acelerar los cohetes a lo largo de rampas de lanzamiento hasta velocidades del orden de 0,8 Mach (950 kilómetros por hora) antes de encender los motores, los costes del lanzamiento de satélites podrían reducirse en una fracción sustantiva. Un sistema de este género podría economizar del 30 al 40 por ciento del coste del combustible necesario, lo que facilitaría la colocación en órbita de una carga útil por un vehículo monofase. Nuestro modelo Inductrack, con una vía de unos 100 metros de longitud, estará diseñado para acelerar una "plataforma lanzadora" —la plataforma del cohete— de 10 kilogramos hasta velocidades del orden de 0,5 Mach (600 kilómetros por hora). Debido a la corta longitud de la vía de prueba (comparada con el kilómetro que aproximadamente tendría el sistema real), los circuitos de propulsión eléctrica para el modelo de la NASA deben lograr niveles de aceleración de 10 g. En la ejecución real del sistema, los niveles de aceleración, limitados por la resistencia y el peso del propio cohete, serían más modestos, del orden de los 3 g.

Otra posible aplicación del Inductrack fue ideada por Douglas J. Malewicki. El sistema que propuso, llamado SkyTran (tren aéreo), transportaría pequeñas cabinas de dos pasajeros a velocidades de hasta 160 kilómetros por hora. Las cabinas irían suspendidas, como las de un teleférico, de una vía monorraíl en la que se asentarían los circuitos levitadores. En cada estación del sistema podrían solicitarse cabinas, y, una vez embarcados los pasajeros, las cabinas se deslizarían por una vía secundaria hasta la vía principal, acelerando para unirse al tráfico rápido. Cuando la cabina se aproximara a su destino, tomaría una vía de salida y frenaría para dejarse caer en la estación donde han de desembarcar los pasajeros.

Como en cualquier nueva técnica dirigida a mejorar o suplantar otra más antigua, sólo el tiempo dirá la aplicación real del Inductrack. En la transición desde la teoría y los prototipos hasta un sistema a escala real deben abordarse numerosas cuestiones técnicas. Por ejemplo, para que el viaje en Inductrack sea más cómodo, se habrán de amortiguar los movimientos causados por las fuerzas aerodinámicas. Otro reto consistirá en despejar la vía de cualquier resto metálico susceptible de ser atraído por las redes Halbach. (Esto podría conseguirse si el vagón de cabeza del tren estuviera equipado con el equivalente magnético de un rastrillo guardarraíles.)

Además, el diseño del Inductrack se enfrenta a un desafío económico sustancial: mantener los costes suficientemente bajos para que se imponga su innegable superioridad sobre los ferrocarriles.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

Puede conseguirse más información sobre el sistema Inductrack en www.llnl.gov/str/Post.html de la WWW.

La página de entrada del Instituto de Investigaciones Técnicas de Ferrocarriles, que ha desarrollado el maglev japonés, está en www.rtri.or.jp/index.html de la WWW.

La página de entrada del Sistema Transrapid, el maglev alemán, está en www.maglev.com/english/index.htm de la WWW.

Saqqara y su tumba del visir

En la mayor necrópolis real del Egipto de los faraones, una misión arqueológica polaca ha descubierto la tumba de un visir del Imperio Antiguo

Karol Myśliwiec



1. LAS EXCAVACIONES de 1998 vistas desde el oeste. Al fondo, la pirámide de Zoser. En primer plano el arquitrabe exterior de la capilla funeraria del visir Fefi.



Al norte y al sur de la pirámide más antigua del mundo, la levantada alrededor del 2650 a.C. para Neterierjet (Zoser), segundo faraón de la III dinastía, se extiende la mayor necrópolis real del antiguo Egipto. Era el cementerio de la ciudad de Men-nefer (Menfis), la capital del Imperio Antiguo, situada en la ribera izquierda del Nilo. Ese relieve de piedra y arena se convirtió en la ciudad de los muertos, el lugar de eterno descanso de soberanos y nobles. El nombre moderno de la parte más antigua de esa necrópolis, Saqqara, viene de Sókaris, dios de los muertos, venerado allí e identificado con Ptah, la divinidad primigenia de Menfis.

Todo lo que queda de la antigua Men-nefer, una metrópolis que irradió cultura a todo el mundo civilizado de la época, son las ruinas que aparecen por aquí y por allá en los campos. Pero las tumbas de la nobleza, construidas en piedra o excavadas en roca, han sobrevivido, protegidas por las áridas arenas traídas desde hace siglos por los vientos de poniente saharianos.

Allí se enterraron personajes principales, antes incluso de que se construyese la primera pirámide, desde los albores del estado egipcio (comienzos del milenio III a.C.). Basándonos en fuentes egipcias, podemos admitir que las tumbas de al menos los cinco primeros faraones de la II dinastía fueron excavadas en la roca cerca de donde luego se alzaría la pirámide de Zoser. Se han descubierto dos de esas estructuras funerarias: la del primer faraón de aquella dinastía, Hotepsekhemuj, y la del tercero, Ninetjer.

La parte de la primera de esas tumbas que se elevaba sobre el nivel del suelo se destruyó ya en el Imperio Antiguo, al construirse la pirámide de Wenis (o Unas), el último faraón de la V dinastía. La tumba de Ninetjer, descubierta por arqueólogos egipcios en 1938, viene siendo estudiada desde 1980 por una misión alemana. En el subsuelo de ambas tumbas discurre un laberinto de pasadizos excavados en la roca. Las dos son contiguas a la más antigua de las pirámides y lindan con el sur de su recinto. ¿Dónde reposarán los otros monarcas de la II dinastía, enterrados sin lugar a dudas en Saqqara?

Desde mediados del siglo XIX, muchas expediciones han concentrado sus investigaciones en Saqqara. Los arqueólogos pusieron su atención en el área que cae inmediatamente al este, al sur y al norte de la pirámide de Zoser. Sacaron a luz espléndidas tumbas de altos dignatarios pertenecientes a diferentes períodos. Desenterraron laberintos de pasadizos subterráneos con los restos momificados de animales sagrados, pirámides inacabadas y el monasterio paleocristiano de San Jeremías. Entre los animales sagrados había toros Apis, cuyos restos momificados se enterraron en el famoso Serapeum, bastante cerca de la pirámide de Zoser.

Entre la entrada del Serapeum y la pirámide se yergue una estructura excepcional: una exedra semicircular del tiempo de los Ptolomeos. Sobre ese podio se erigieron estatuas de poetas y filósofos griegos; se pretendía que fuese un "escaparate" de la civilización griega. Muy pocos reparan hoy en su interés, atraídos por las tumbas monumentales de épocas anteriores donde yacen faraones y toros sagrados.

¿Por qué se hizo cuando los Ptolomeos (que gobernaron Egipto del 305 al 30 a.C.) esa exhibición del potencial creador griego? Algunos opinan que se quiso conmemorar así el lugar donde estuvo en un principio enterrado Alejandro Magno, conquistador de Egipto en el 332 a.C. Según Pausanias, famoso escritor, geógrafo y explorador griego del siglo II a.C., Ptolomeo I Sóter, fundador de la dinastía lágida, hizo que se llevara a Egipto el cuerpo del caudillo y se le enterrase en Menfis. Más tarde fue trasladado a Alejandría. No se han encontrado ni la tumba menfita ni la alejandrina. Si la exedra de los filósofos vale como indicio, la búsqueda del enterramiento menfita de Alejandro debería llevarnos al sur del podio, al área que cae inmediatamente al oeste de la pirámide de Zoser.

Nuestras primeras campañas

En esa área, despreciada por los arqueólogos, de la que se creía incluso que era un "vertedero" o cantera de la necrópolis real, puso sus ojos una expedición polaca. Los trabajos empezaron en 1987, organizados por el Centro polaco de arqueología del Mediterráneo de la Universidad de Varsovia; fundó esa institución Kazimierz Michałowski, y ahora lleva su nombre.

Al escoger la zona, al oeste de la pirámide de Zoser, no nos movió sólo su estado virgen. Un conocimiento elemental de las religiones y de las costumbres funerarias del Antiguo Egipto indica que el "oeste" se reservaba a los "vivos", es decir, a



2. PARTE DE LA NECROPOLIS de Saqqara alrededor de la pirámide de Zoser (*arriba*). A la izquierda, el estado de los faraones.

los moradores de la eternidad. Cabía, pues, que a ese lado de la pirámide estuvieran enterrados personajes principales del Imperio Antiguo.

Había que empezar por el estudio geofísico de la zona. De los cambios de la intensidad del campo magnético terrestre medidos inferimos la existencia de extensas estructuras ocultas bajo una capa de arena. Practicamos, pues, unos pozos de sondeo, cada uno de 5 × 5 m, repartidos estratégicamente en tres puntos distintos. Así pudimos conocer que una parte importante de la necrópolis menfita se extendía hacia el oeste de la pirámide más antigua del mundo. Las sepulturas iban desde comienzos del milenio III a.C. hasta la época bizantina. Ante nosotros se abrían numerosos pozos de enterramiento excavados en la roca, por donde se accedía a las cámaras subterráneas, y restos humanos momificados que yacían directamente sobre la arena. Las momias de los más pudientes tenían un revestimiento de yeso, un *cartonnage*, cuya decoración pictórica era rica y exquisita.

En aquella primera campaña se cosecharon resultados de sumo interés; en especial, los misteriosos descubrimientos de la trinchera más cercana a la pirámide de Zoser, unos cien metros a su oeste. Se encontró un muro grueso, paralelo a la cara de la pirámide, que corría en dirección norte-sur. Estaba hecho de bloques irregulares de piedra, unidos con barro; lo coronaba una hilada de adobes, desmontados ya en la antigüedad. Por quién y con qué propósito, son preguntas aún por responder.

Este muro, levantado sobre la superficie nivelada de la roca firme, mostraba todas las características de una estructura propia de las primeras dinastías egipcias. Los fragmentos de cerámica encontrados en las capas de rocalla y arena apoyadas contra la pared confirmaron la datación. La presencia de unos baldosines de loza, con una superficie vidriada azul —los mismos utilizados en las paredes de algunas salas de los pasadizos del complejo funerario de Zoser— parece indicar que el muro se construyó, en efecto, durante ese período. Nos preguntamos si no podría tratarse de la superestructura de la tumba de un dignatario o si no habría formado parte del complejo funerario del propio Zoser.

La búsqueda de las respuestas tropezó con obstáculos durante nueve años. Sin fondos, no pudimos construir un depósito permanente para los objetos hallados, condición impuesta para la continuidad de las exploraciones. Durante nuestra ausencia británicos y japoneses se pusieron también a trabajar en el lado occidental de la pirámide de Zoser, un poco más dentro del desierto. Los primeros se contentaron con un rastreo. Pero los japoneses descubrieron en una colina una construcción de interés, adscrita a la época de Ramsés II (Imperio Nuevo, XIX dinastía, siglo XIII a.C.).

Volvimos a la zona en 1996, ahora como expedición polaco-egipcia. La parte egipcia aportaba espacio en almacenes ya existentes. Tras una ausencia tan larga, nos dedicamos a ampliar la cuadrícula de excavación más cercana a la pirámide, donde había aparecido el muro misterioso. Se confirmaba la veracidad de una

KAROL MYŚLIWIEC dirige el centro de investigaciones de arqueología mediterránea de la Academia Polaca de Ciencias y el departamento de arqueología egipcia de la Universidad de Varsovia. Su primera campaña egipcia se remonta a 1969. Desde 1987 está al frente de las excavaciones de Saqqara.



3. MOMIAS DE UNA MADRE Y SU HIJO, que seguramente murieron a la vez. La sepultura, de época romana, está delimitada por un murete de bloques de caliza procedentes de estructuras más antiguas.

extraña paradoja de la arqueología: los hallazgos más interesantes se hacen en los primeros y últimos días del trabajo de campo. En cuanto empezamos a extender la trinchera hacia el sur, nos encontramos de repente con que el muro doblaba en ángulo recto y avanzaba hacia la pirámide, siguiendo una línea que prácticamente coincidía con la prolongación del eje de ésta. Debíamos, pues, excluir que se tratara del muro que cerraba por el oeste el complejo funerario de Zoser.

No tardamos en comprobar que el muro ceñía una tumba de notables proporciones. ¿A qué personaje se habría enterrado allí?

Una tumba desconcertante

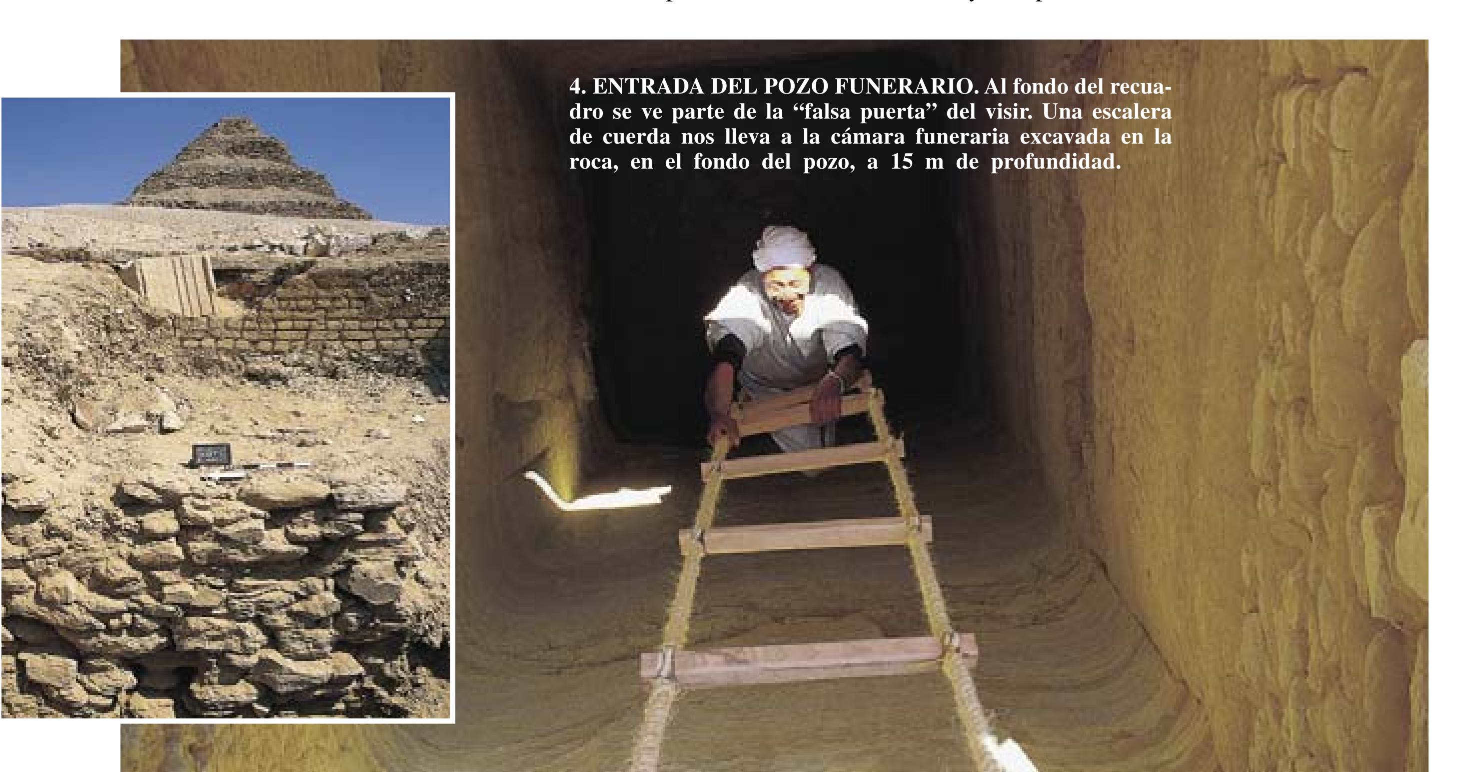
Para dar con una explicación tuvimos que seguir excavando hacia el este, hacia la pirámide de Zoser. Allí los estratos de arena y rocalla que cubrían estructuras de las primeras dinastías eran más potentes. No cabe recurrir a medios de excavación mecánicos, para evitar dañar las numerosas sepulturas de la época ptolemaica y de los comienzos del período romano, que han de retirarse con cuidado. Además de momias dejadas en la arena o de esqueletos que yacen sobre alfombras y cubiertos también con alfombras, hay también *cartonnages*, finamente decorados, pintados e incluso en parte dorados. Uno de éstos, de terracota, remeda la figura humana, con el rostro en relieve. En los sarcófagos de madera se leen textos jeroglíficos, fragmentos de oraciones dirigidas a divinidades diversas.

En el suelo de la excavación, la superficie allanada de la roca viva aparecía cubierta de una espesa capa de arcilla que contenía restos esqueléticos de animales. Sobre el "pavimento" distinguimos signos de hornos rituales: unas manchas redondas y rojas con un núcleo negro. Se hacían fuegos en las ceremonias religiosas dedicadas al culto de los muertos. Quedó claro que nos las veíamos con un patio abierto en la roca y rodeado por un muro. Esperábamos encontrar allí pasadizos subterráneos que condujesen a una cámara funeraria ricamente decorada en la que reposaría el difunto.

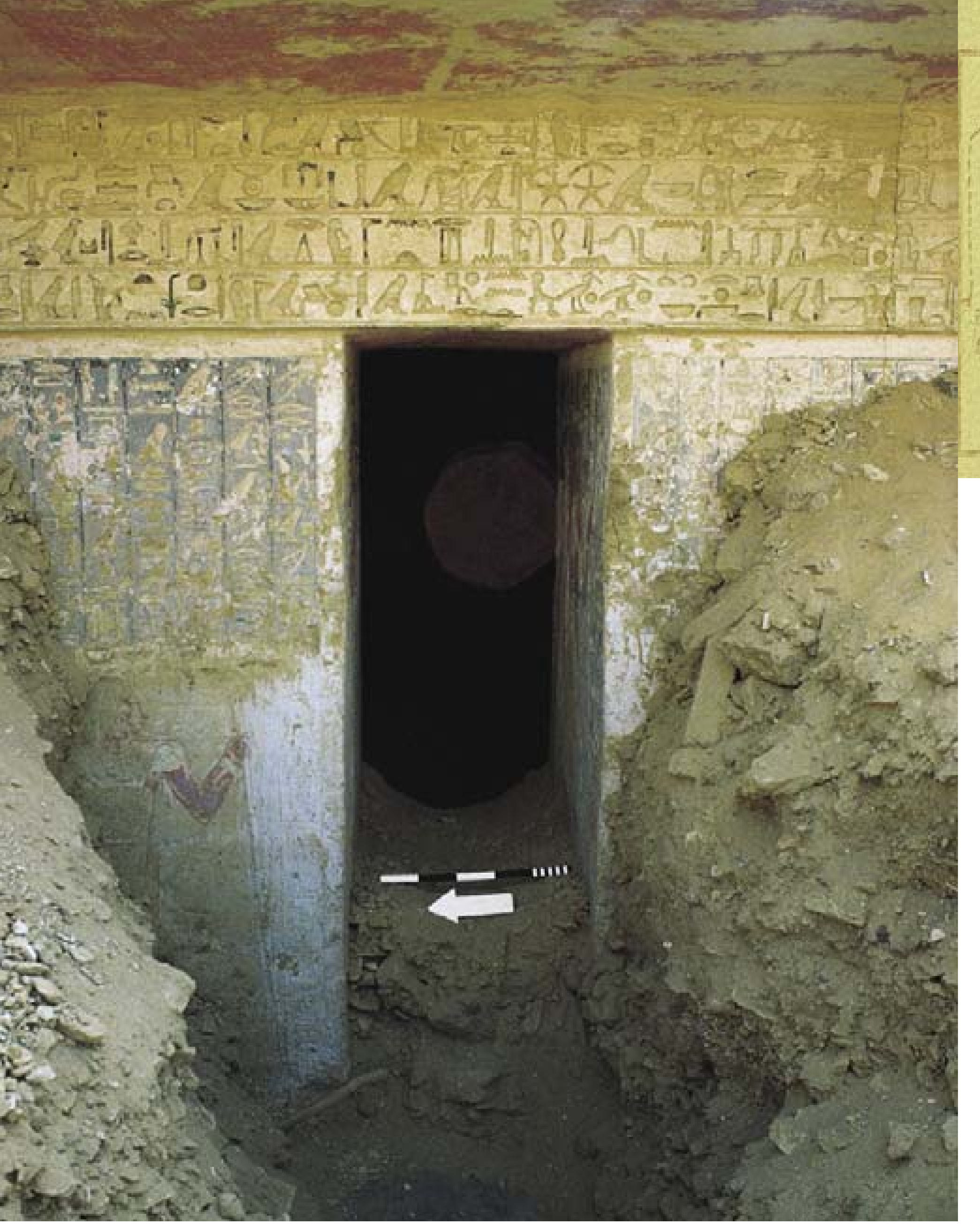
La estructura recordaba a la superviviente de la tumba de Ninetjer, monarca de la II dinastía ya mencionado. La sepultura se encuentra a 300 metros escasos al sudeste de nuestras excavaciones. ¿No estaríamos descubriendo una nueva tumba real del período Arcaico?

La respuesta podría esconderse en las inscripciones, si las había, dentro de la tumba. Confiábamos hallarlas en buen estado. Mas para acceder a ellas teníamos que dar primero con la entrada.

Nos esperaba una sorpresa. Mientras explorábamos los enterramientos ptolemaicos y romanos de los estratos superiores, encontramos un montículo



4. ENTRADA DEL POZO FUNERARIO. Al fondo del recuadro se ve parte de la "falsa puerta" del visir. Una escalera de cuerda nos lleva a la cámara funeraria excavada en la roca, en el fondo del pozo, a 15 m de profundidad.



5. EL “ARQUITRABE INTERIOR” se extiende a lo largo de la pared anterior, entre el techo y el borde superior de la entrada a la capilla funeraria. Se trata de un tablero rectangular inciso con una inscripción jeroglífica de cuatro líneas que contiene valiosas informaciones (*arriba a la derecha empieza una reproducción detallada del conjunto y sigue en las páginas siguientes*). Cada línea acaba con uno de los tres nombres del difunto; el “gran nombre” Meref-nebef aparece dos veces. En el lado norte el panel acaba con una especie de “tarjeta de visita” del muerto, un rectángulo con un retrato del visir y, de nuevo, sus principales funciones. La forma y la ejecución de la inscripción que decora el “arquitrabe interior” son diferentes de la inscripción jeroglífica tallada en la roca del “arquitrabe exterior”. Por la forma, la inscripción del arquitrabe interior recuerda a los *Textos de las pirámides*, inscritos en las tumbas reales de la época. La superficie rocosa está revestida con una fina capa de aguada de yeso cuya textura imita la caliza, el material en el que solían inscribirse las obras más antiguas de la literatura religiosa egipcia. Por dentro, los signos se rellenan con pintura azul, lo que una vez más demuestra su relación con la decoración de las tumbas reales de entonces, así la de Wenis. Es excepcional el colorido de la decoración de la parte inferior de la fachada. Un mosaico de signos tallados en bajorrelieve forma columnas verticales. El relieve, en su conjunto, está recubierto con yeso y los signos se remarcan con pintura. Los polícromos jeroglíficos, cuyos detalles iconográficos están modelados con suma finura, resaltan sobre un fondo azulgrisáceo uniforme. Este texto, que consta de 51 columnas, es una especie de “testamento”; contiene disposiciones acerca del culto del difunto. Debajo del testamento, en la parte inferior de esta rica decoración, se muestra al visir ocho veces, caminando en dirección a su tumba. En la foto se ve la fachada antes de que se despejase por completo, cuando sólo se apreciaba una de las ocho figuras.

de adobes. Resultó ser una enorme bóveda, pluriestratificada y ocultada por una gruesa capa de bloques de piedra de diferentes tamaños cuidadosamente apilados; ese material se habría extraído en el proceso de excavación de cámaras funerarias en la roca; los bloques habrían servido para celar un recinto que no debía verse. La pila descansaba en el fondo de dos “pozos” excavados en la roca separados por una plataforma de piedra que se extendía hacia la pirámide. Ambas depresiones terminaban a un nivel de alrededor de un 1,40 m por debajo de la superficie del patio.

El misterio del punto hacia donde conducían los pasadizos no se resolvió hasta la campaña siguiente. El resto de la estructura estaba cubierta con arena y rocalla de épocas sucesivas. Pese a ello estábamos ya seguros de varias cosas. La parte oriental del patio de una tumba más antigua fue arrasada sin miramientos por la construcción de una nueva, perteneciente, sin duda, a otro personaje importante. El acabado irregular y muy primitivo de la roca del linde rocoso entre el patio y los “pozos” verticales revela las prisas de los constructores posteriores y su poco respeto por la estructura anterior. ¿Quién era ese hombre que se atrevió a adaptar, y en parte destruir, la tumba de un personaje principal, quizás incluso de un soberano de tiempos más antiguos?

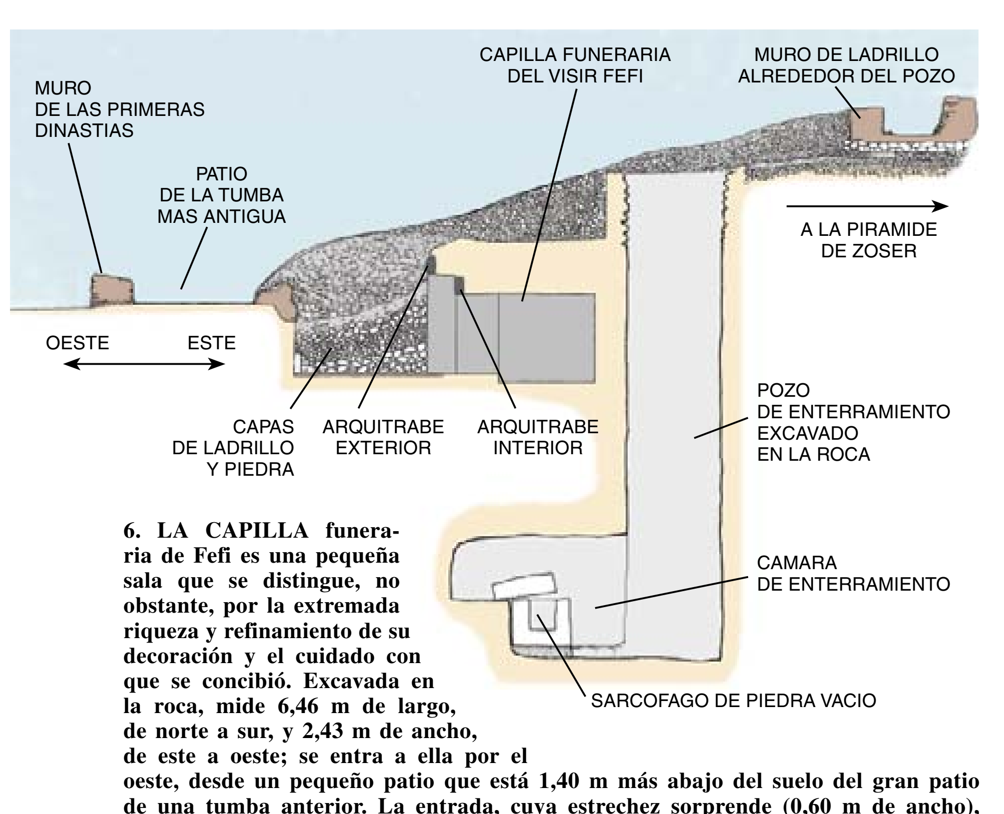
Los fragmentos de cerámica encontrados en el estrato que cubría esta estructura indican que la devastación parcial de la tumba por el nuevo propietario se produjo en el período del Imperio Antiguo, es decir, en la segunda mitad del milenio III a.C. Sorprende aún más que la tumba del usurpador fuese obstruida poco después de haber sido excavada en la roca. Al fin y al cabo, pudo servir a lo largo de los siglos, lo mismo que muchas otras capillas funerarias de dignatarios, como lugar para la prác-



tica del culto a los muertos. Parece que la mayor parte de los adobes que se usaron para ocultar la entrada procedían del desmantelamiento de la parte superior del muro que rodeaba el patio más antiguo. Y aunque parecía que el misterio del muro se había resuelto, ahora teníamos que enfrentarnos a un problema completamente diferente. ¿Quién cegó la tumba más moderna y con qué propósito?

Un año después, en 1997, nos pusimos manos a la obra con el objetivo de explorar la zona que se extendía otros diez metros hacia la pirámide de Zoser. En los primeros minutos de trabajo, debajo mismo de la superficie, se descubrió una serie de grandes bloques de caliza blanca que descansaba sobre una capa de arena. Su orientación norte-sur y su disposición paralela a la cara de la pirámide indicaban sin ambages que se trataba del cercado de un gran complejo arquitectónico. Adosado a ellos, un muro de adobe formaba el margen oriental de un patio rectangular.

En el margen norte de ese patio, al mismo nivel que el cimiento de los muros de ladrillo, se despejó una superficie de arena limpia. Marcaban su borde meridional momias y esqueletos que reposaban sobre bloques pétreos, que resultaron ser el borde superior de un gran pozo sepulcral. Las paredes de piedra del pozo tenían unos 2,50 m de profundidad; más abajo, el resto del hoyo se había excavado en roca viva. La estructura, que en el momento del descubrimiento estaba rellena de arena, medía 2,30 m de lado, bastante para que descendiese por allí un sarcófago en posición horizontal. Encontramos el sarcófago a 15 m bajo tierra, en el interior de una cámara funeraria que se abría desde el pozo hacia el oeste. El sarcófago —lo mismo que las paredes de la cámara funeraria— carecía de ornamentación. Diríase que los canteros trabajaron en vano: el inacabado sarcófago no se usó nunca para acoger a un difunto. Sólo en la superficie de la rocalla que lo cubría, justo, casi, bajo el techo de la cámara, se encontró un esqueleto, con los restos de un arpa de madera. Por desgracia no ha quedado indicio alguno que ayude a identificar a este intruso, que cabe suponer esperaba encontrar un mejor botín en la tumba.

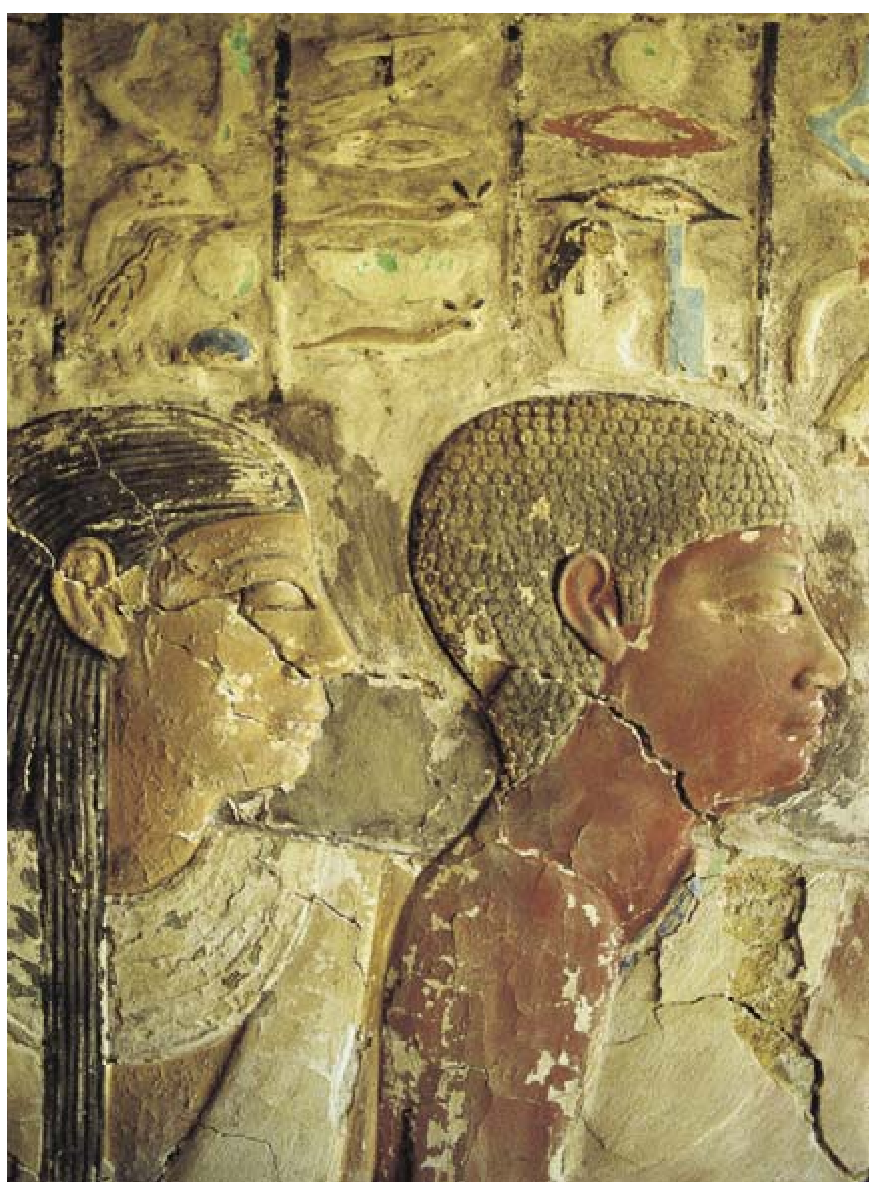


6. LA CAPILLA funeraria de Fefi es una pequeña sala que se distingue, no obstante, por la extremada riqueza y refinamiento de su decoración y el cuidado con que se concibió. Excavada en la roca, mide 6,46 m de largo, de norte a sur, y 2,43 m de ancho, de este a oeste; se entra a ella por el oeste, desde un pequeño patio que está 1,40 m más abajo del suelo del gran patio de una tumba anterior. La entrada, cuya estrechez sorprende (0,60 m de ancho), está en medio de una majestuosa fachada, diseñada como un nicho (5,89 m de largo), abierto en la roca. Mide el nicho 0,68-0,72 m de profundidad y 2,47 de alto. La parte frontal está coronada por un arquitrabe con los títulos del difunto inscritos mediante un relieve hundido. Entre este arquitrabe y la pared del fondo de la capilla el techo está pintado de rojo, a imitación de granito.

El visir Meref-nebef y sus hijos

Mientras, las exploraciones en la parte occidental del yacimiento condujeron a un hallazgo arqueológico de los que causan verdadera sensación. Al retirar la rocalla y la arena que obstruían la entrada a una tumba de roca del Imperio Antiguo, descubrimos una fachada espléndida, decorada con inscripciones jeroglíficas. Podíamos ya identificar al propietario de la tumba. Vivió a finales del Imperio Antiguo y fue el responsable de la destrucción de la tumba precedente. Desempeñó el puesto de visir —en el antiguo Egipto, el siguiente en importancia al faraón— y se llamaba Meref-nebef. Tenía otros dos nombres: “el bello





7. UNOS BAJORRELIEVES representan, en las paredes laterales de la angosta entrada de la capilla funeraria, al difunto visir en la compañía de una mujer, siempre distinta. Según la inscripción sólo una de ellas era la esposa de Meref-nebef. Las otras consortes del visir están representadas en las paredes interiores de la capilla funeraria; de cinco de ellas, Iret, Seshseshet, Nebet, Mechetu y Hemi, se nos dice que son sus esposas. En una escena donde se ve al visir mirando a un grupo de bailarinas escuetamente vestidas, esas esposas figuran como arpistas que acompañan a las bailarinas.

nombre" de Fefi y el "gran nombre" de Wenis. Estos nombres sugieren la fecha de la tumba, porque el segundo es el del último monarca de la V dinastía, Wenis, y el primero recuerda al del primero de la sexta, Teti. Al leer la inscripción jeroglífica tallada en el dintel de esa hermosa fachada descubrimos que el visir Fefi había sido sacerdote del culto funerario en la pirámide de Teti, que sigue en pie, al otro lado de la de Zoser, es decir, a su nordeste. Puesto que la pirámide de Wenis se encuentra al sudoeste de la de Zoser, resulta obvio el motivo de la ubicación de la tumba del visir, entre los monumentos funerarios de los dos faraones.

La decoración tallada en las paredes de la capilla funeraria de Fefi presenta un caleidoscopio de escenas conocidas por las tumbas de los dignatarios menfitas de mayor rango del Imperio Antiguo. Algunas de las escenas son miniaturas, pero conservan todas los colores brillantes que otras tumbas han perdido.

Nada era más importante para la vida del visir en el más allá que los elementos de la decoración que alegraban las paredes norte y oeste de la capilla. En la pared occidental, a ambos lados de la entrada, se tallaron unas "falsas puertas" por las que el difunto podía relacionarse con el mundo de los vivos, sobre todo para consumir las ofrendas que le traían los sacerdotes. Junto a las "falsas puertas" hay escenas que representan abundantes ofrendas animales y vegetales y una variedad de recipientes en los que se presentaban las diferentes ofrendas. Vemos una procesión de oferentes que llevan pájaros, cuartos traseros de vacas, verduras y flores; sobre la procesión, dos largos elencos que enumeran todas esas magníficas ofrendas y muchas otras también. Un escalón esculpido en la roca, un poyo parece, seguramente pensado para esas ofrendas, corre a lo largo de las

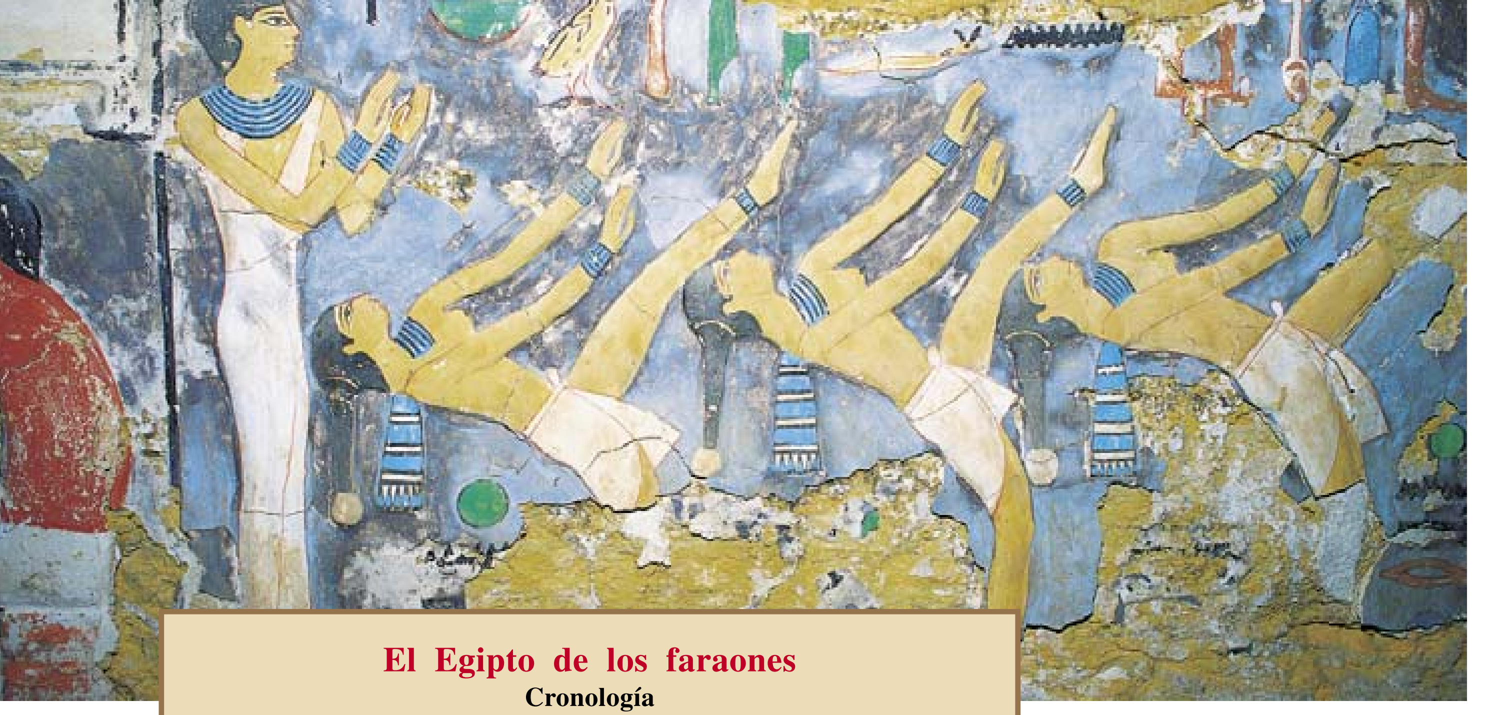


paredes decoradas. Los fragmentos cerámicos encontrados en la rocalla que llenaba la capilla casi hasta un tercio de su altura dan testimonio de los rituales oferentes que tenían lugar ante la capilla y en su interior.

Las imágenes de los hijos del visir proporcionan una información interesante sobre la vida cotidiana en la época. Da la impresión de que algunas representaciones fueron destruidas por enemigos, cabe suponer que tras la muerte del visir. Las borraron a martillazos con precisión asombrosa; sólo quedaron intactas las imágenes de uno de los hijos, un chico llamado Fefi, como su padre. Observamos pruebas inequívocas de *damnatio memoriae* en cuanto entramos en la tumba. De todas las figuritas filiales que caminan junto al muerto, sólo el retrato del que llevaba el nombre del visir, en la pared sur de la entrada, no ha sido machacado. El joven Fefi vuelve su cabeza amistosamente hacia un hermano, pero de éste no queda más que una impresión "en negativo". Hemos supuesto que ambos eran los hijos de la esposa que acompaña al difunto en esta escena.

La destrucción a martillazos de varias figuras es, sin duda, la prueba de conflictos desatados entre los numerosos hijos, a la muerte del visir. Suponiendo que fueran hijos de diferentes esposas, podemos imaginarnos fácilmente las escenas que debieron

8. UN COLORIDO APASTELADO y una determinada disposición atraen la atención hacia el extremo meridional de la pared oriental: son escenas de pesca, de transporte y ofrenda de dones del Nilo a los difuntos. Se representa otra de las consortes del visir, de nombre Hemi, pero no al lado del marido, sino sentada sola. Esta parte de la decoración parece haber sido ejecutada más tarde que las demás escenas; Hemi sería quizá la última consorte de Meref-nebef.



9. ALGUNAS ESCENAS de la vida del difunto en la tierra están representadas en las paredes sur y este. La pared meridional se halla ocupada por una representación de una ceremonia en la que participa el visir con una de sus esposas (no nos ha llegado su nombre). Observan la actuación de unas bailarinas que adoptan varias poses, algunas verdaderamente acrobáticas.

El Egipto de los faraones
Cronología

Comienzo del estado egipcio con la unión
del Alto y del Bajo Egipto . . . . alrededor del 3100 a.C.
Período de las primeras dinastías,
llamado también arcaico . . . . alrededor del 3100 al 2686 a.C.
Dinastías:
I – (Narmer, Aha, Den, Ka) . . . . alrededor del 3100 al 2890 a.C.
II – (Hotepsekhemuj, Raneb, Ninetjer,
Weneg, Senej, Peribsen, Jasejemuj) . . . . alrededor del 2890 al 2686 a.C.

Imperio Antiguo . . . . alrededor del 2686 al 2181 a.C.
Dinastías:
III – (Zoser, Sekhemkhet) . . . . alrededor del 2686 al 2613 a.C.
IV – (Keops, Kefrén, Micerino) . . . . alrededor del 2613 al 2494 a.C.
V – (Userkaf, Sahure, Niuserre, Wenis) . . . . . . alrededor del 2494 al 2345 a.C.
VI – (Teti, Pepi I, Pepi II) . . . . alrededor del 2345 al 2181 a.C.

Primer período intermedio:
dinastías VII-X . . . . alrededor del 2181 al 2133 a.C.

Imperio Medio . . . . alrededor del 2133 al 1786 a.C.
Dinastías:
XI – (Intef I-III, Mentuhotep I-III) . . . . alrededor del 2133 al 1991 a.C.
XII – (Amenemhat I-IV, Sesostris I-III). . . . . alrededor del 1991 al 1786 a.C.

Segundo período intermedio:
dinastías XIII-XVII . . . . alrededor del 1786 al 1567 a.C.
(con las dinastías hicsas)

Imperio Nuevo . . . . alrededor del 1567 al 1085 a.C.
Dinastías:
XVIII – (Amenhotep I-IV, Tutmosis I-IV,
Tutankhamon, Horemheb) . . . . alrededor del 1567 al 1320 a.C.
XIX – (Ramsés I-II, Seti I) . . . . alrededor del 1320 al 1200 a.C.
XX – (Ramsés III-XI . . . . alrededor del 1200 al 1085 a.C.

Tercer período intermedio:
dinastías XXI-XXV, ... alrededor del 1085 al 656 a.C.
con la dinastía cushita (XXV)

Período tardío: dinastías XXVI-XXXI, ... del 664 al 632 a.C.
con dos períodos de ocupación persa (dinastías XXVII y XXXI)

Conquista de Egipto por Alejandro Magno . . . . 332 a.C.

Reinado de los Ptolomeos . . . . del 305 al 30 a.C.
(capital en Alejandría): Ptolomeo I-XII y Cleopatra VII

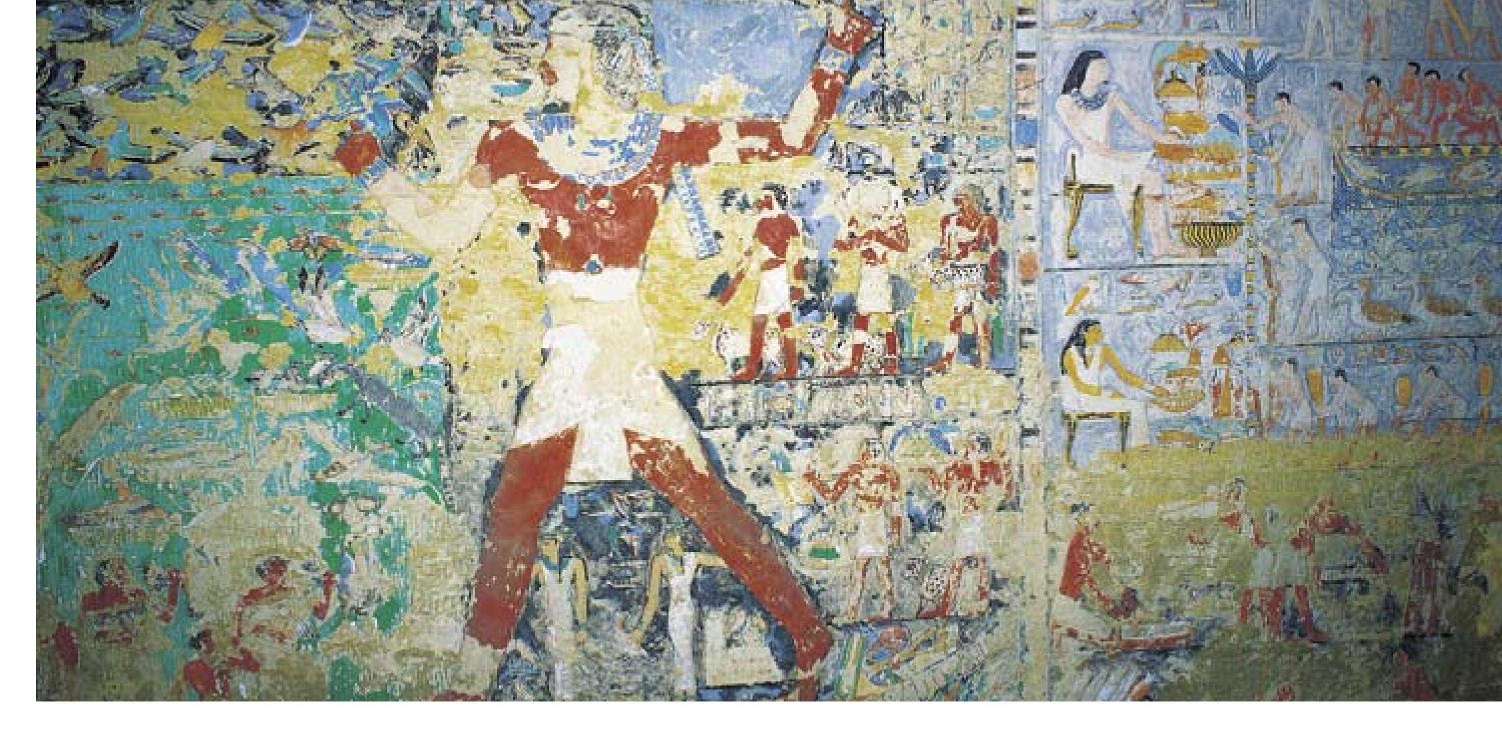
Dominio romano . . . . del 30 a.C. al 323 d.C.

Período bizantino . . . . del 323 al 641

de sacudir la armonía familiar en la tumba. Quizá fuesen esos conflictos la razón de que alguien de la familia o un sacerdote del culto funerario, en un intento desesperado de salvar el honor de la familia, ordenase que se ocultasen a la vista la entrada de la tumba y la fachada entera.

Caben otras razones, asociadas o no a la anterior. La obstrucción debió de suceder no mucho después de la muerte del visir, como se deduce de la absoluta ausencia de cualquier objeto que pueda considerarse posterior al Imperio Antiguo. Es posible que una de las razones principales para sellar la tumba fuesen las dificultades experimentadas por los canteros, incapaces de completar su obra a causa de la extrema fragilidad de la roca allí. Apenas si hay un lugar donde no queden huellas de la ardua lucha de canteros y artistas contra el material deficiente al que se vieron obligados a dar forma. Fragmentos de los grandes signos jeroglíficos del arquitrabe exterior están moldeados en yeso, con el que rellenaban los cascotes desprendidos de la caliza blanda.

En la parte meridional de la fachada de la tumba, al sur del nicho de entrada, se empezaron las obras de una monumental "falsa puerta" tallada. Nunca se acabó. Cuando estaban a



10. UNA ESCENA DE CAZA entre las cañas decora la pared este de la capilla funeraria.

alrededor de un tercio de la altura, los artistas se toparon con una piedra blanda que se desmenuzaba y hacía imposible tallar en línea recta. La superficie rocosa a ambos lados de la estela se alisó provisionalmente, pero nunca llevó incisas inscripciones jeroglíficas. Justo a continuación de la "falsa puerta" sin terminar encontramos una losa de piedra trabajada sólo en parte; puede suponerse que los constructores pensaban emplearla como elemento de la decoración arquitectónica de la fachada. Parece que, entre el nicho frontal y la "falsa puerta" sin acabar, querían un arquitrabe cuyo borde oriental debería haber sido insertado en una oquedad abierta en la roca. El extremo oeste debería haber descansado en un pilar que iría, se supone, sobre esa plataforma de roca que los canteros dejaron frente a la fachada. Tampoco se terminó.

Fuesen cuales fuesen las razones de la drástica decisión de sellar la tumba, lo cierto es que la gruesa capa de piedras y la aún más gruesa bóveda de adobe la camuflaron tan eficazmente, que nadie entró en ella. Hasta el final del período dinástico, es decir, hasta el principio del reinado de los Ptolomeos, los egipcios no volvieron a usar el área como necrópolis. Cuando, tras la muerte de Alejandro Magno, le dieron de nuevo ese destino, se valieron de la bóveda de adobe, pues los adobes eran un material excelente para reutilizarlo en los muretes de revestimiento de tumbas sencillas.

¿Por qué se reanudaron los enterramientos pasados dos mil años? Si la razón del abandono inicial fue el respeto a los muertos de antaño, ¿por qué se arrumbó esa tradición a principios del reinado ptolemaico? Si los descubrimientos arqueológicos confirmasen la hipótesis de que la tumba de Alejandro Magno estuvo cerca del Serapeum menfita y la exedra con las estatuas de griegos famosos, entenderíamos mejor la súbita "moda" de enterrar los muertos en la parte occidental de la necrópolis real de Saqqara. Un lugar de enterramiento cerca del divinizado líder macedonio, que había liberado Egipto del yugo persa, sería, cabe imaginar, la localización ideal en la que soñarían como lugar de eterno reposo las generaciones siguientes.

La ira de los dioses

La misión arqueológica polaco-egipcia tiene aún por delante muchos años de trabajo sistemático antes de que las preguntas planteadas en estas páginas queden respondidas a nuestra satisfacción. El trabajo del arqueólogo está lleno de sorpresas; además, los conocimientos arrancados al suelo descubren nuevos misterios y problemas necesitados a su vez de solución. En ocasiones el tributo es aún mayor y toma formas tan extremas que el arqueólogo no puede sino creer que la venganza de los antiguos nos alcanza desde el más allá.

Eso es lo que nos ocurrió a nosotros. Justo cuando nos pusimos a descubrir la fachada de la tumba del visir estalló una tormenta de arena, de una violencia descomunal. Arrancó las tiendas e hicieron falta varios días para limpiar los equipos. Al mismo tiempo se nos averió el coche y llegaron dos grupos de visitantes, cada uno por su lado, uno de diplomáticos, el otro de arqueólogos, que querían que se les enseñase el yacimiento. La arena no dejaba de azotarnos salvajemente. Un día entero hizo falta para que se calmase la cólera de los dioses.

Al día siguiente reinaba un silencio absoluto alrededor de la pirámide y el aire no podía ser más diáfano. Como de costumbre, nos levantamos al romper el día y llegamos a la pirámide justo cuando el sol salía sobre el horizonte. Las dos primeras horas de la mañana, mientras el sol sigue oculto tras la pirámide, son el mejor momento para que redoblemos nuestros esfuerzos en pos de desvelar algunos de los misterios del antiguo Egipto.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE TETI CEMETERY AT SAQQARA. N. Kanawati y A. Hasan; vol. II: THE TOMB OF ANKHMAHOR; The Australian Center for Egyptology Reports: 9, Warminster, 1997.

A NEW MASTABA, A NEW VIZIER. K. Myśliwiec, *Egyptian Archaeology, The Bulletin of the Egypt Exploration Society*, n.º 13, páginas 37-39, 1998.

DIE WANDDARSTELLUNGEN IM GRAB DES MEHU IN SAQQARA. H. Altenmüller; Archäologische Veröffentlichungen 42, Deutsches Archäologisches Institut Abteilung Kairo, Maguncia, 1998.



El declive de las ciencias en la segunda enseñanza, más tópico que realidad, puede inducir a reformas apresuradas que olvidan los mejores consejos sobre qué tendrían que saber los jóvenes

1. ALUMNOS de undécimo grado [3º ESO] en prácticas de química.

Enseñanza de las ciencias

W. Wayt Gibbs y Douglas Fox

Se acababan de recibir los resultados definitivos del Tercer Estudio Internacional de Matemáticas y Ciencias (TEIMC), y los alumnos de último curso de secundaria habían quedado cerca del furgón de cola.

"No hay disculpa posible", reprochaba el presidente Clinton. "Tales resultados son del todo inaceptables", amonestó el secretario de educación. El presidente de la Asociación Nacional de Educación manifestó que las escuelas estadounidenses se hallaban en estado de crisis. Y ahora, Bruce Alberts, director de la Academia Nacional de Ciencias, estaba diciendo que también él veía en este informe "todos los elementos de una tragedia en la enseñanza". Con editorialistas y docentes haciendo voltear obedientes las campanas a rebato, la enseñanza dio otro bandazo y decidió, una vez más, entrar en crisis.

En opinión de Gregory J. Cizek, de la Universidad de Toledo (en Ohio), se trata de un ritual cíclico, repetido en cada decenio desde los años cuarenta. En 1957, el lanzamiento del *Sputnik* desencadenó en los EE.UU. una ansiedad generalizada, que culminó en 1963 con el libro *American Education: A National Failure* ("La enseñanza en los Estados Unidos: un fracaso nacional") de Hyman Rickover, un personaje notorio por haber pronosticado que "los rusos nos van a enterrar", gracias al mayor rigor de sus cursos de ciencias y matemáticas. La publicación en 1983 de *A Nation at Risk* ("Una nación en peligro") indujo, uno tras otro, a comités del máximo prestigio a hacer saber que el enorme fracaso en la educación había entregado el liderazgo técnico de los Estados Unido a Japón y a otros competidores. Una conclusión, cuando menos, precipitada.

Tras espigar en la bibliografía pedagógica de los últimos 30 años, Cizek ha mostrado que pasan de 4000 los artículos y libros en los que docentes y académicos denuncian crisis escolares de diverso jaez, aunque rara vez se toman la molestia de enunciar cuál va a ser el cataclismo inminente. Y cada episodio ha ido mermando también la confianza del público en las escuelas, que ha caído un 38 por ciento desde 1973 hasta 1996.

Las crisis comparten todas un mismo tema, a saber, que los Estados Unidos están a punto de perder la primacía económica y científica porque las escuelas no están produciendo suficientes científicos, ingenieros y operarios de alta cualificación técnica. Por ello, la crisis escolar hace temer por la capacidad del país para competir en la economía global y para elevar el nivel de vida de los ciudadanos.

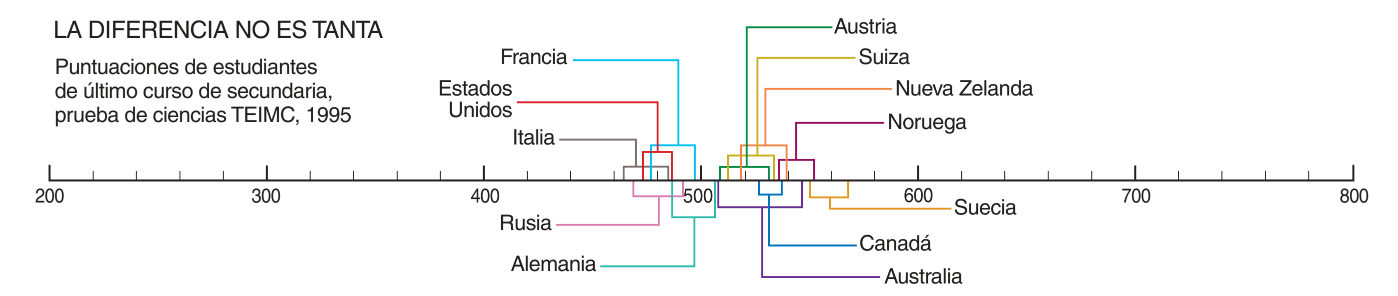
Cizek se empeña "en que tendríamos que ser más escépticos sobre las declaraciones de crisis". Otros historiadores de la educación están de acuerdo. Pese al apego de los investigadores por este recidivante fenómeno y por las inyecciones dinerarias que comporta, hay tres razones para poner en duda su utilidad. Para empezar, las crisis del pasado han desembocado en gastos derrochadores y voluminosa legislación, casi mil leyes reformistas desde los años setenta, sin que varíe apenas lo que los estudiantes llegan a aprender. En las crisis, señala Paul DeHart Hurd, los políticos son propensos a lanzar grandes reformas basadas en pruebas endebles.

California, por ejemplo, ha invertido 3700 millones de dólares para reducir el número de alumnos por aula, en vista de que Tennessee obtuvo así resultados rápidos en ensayos a pequeña escala. Transcurridos tres años, las calificaciones de los escolares no han variado apenas.

Un segundo motivo de escepticismo es que un examen atento de los datos estadísticos no revela un súbito declive en los conocimientos de ciencias y de matemáticas de los jóvenes al terminar la secundaria. Antes bien, las puntuaciones de los adolescentes, en pruebas a escala nacional, han ido mejorando durante más de un decenio; según las encuestas, el adulto joven conoce algo más de ciencia básica que sus padres o sus abuelos.

De 1980 a 1995, la matrícula en centros norteamericanos de enseñanza superior se ha incrementado en un 29 por ciento, pese al descenso en la población de jóvenes en edad universitaria. En 1996, los docentes podían exhibir doble número de titulaciones superiores y doble número de años de experiencia que sus colegas de 1966. En el mismo período, el número de alumnos de secundaria por profesor se redujo en un 27 por ciento. Este decenio ha visto dispararse el número de titulados superiores en ciencias o en ingeniería.

¿Cómo se explica, pues, el decepcionante papel de los adolescentes en el TEIMC, un estudio de cuatro años de duración, efectuado sobre un grupo de 500.000 escolares



2. LA MALA CLASIFICACION de los escolares estadounidenses en el TEIMC levantó ampollas. Los datos estadísticos puros revelan, sin embargo, que las puntuaciones medias de los principales competidores de los EE.UU. están muy apiñadas, y más, si nos fijamos en los intervalos de confianza.

pertenecientes a una cincuentena de países, al que incluso sus detractores, como Gerald Bracey, conceden que es “el mayor, y metodológicamente mejor controlado” de todos los tests de este tipo? No faltan autoridades que hayan considerado injusto comparar a los estudiantes estadounidenses con los de países que exigen una escolarización más prolongada, o que imparten más cursos de ciencias. También Bracey se queja de que en varios de los países con más altas puntuaciones, los estudiantes de los últimos cursos tienen mayor edad y menores oportunidades de carácter laboral que los escolares norteamericanos.

William H. Schmidt, coordinador de la rama estadounidense del TEIMC, replica que tales críticas olvidan el propósito de un estudio internacional, que es esclarecer la influencia de las distintas formas de gestión escolar en lo que aprenden los estudiantes. Después de todo, en EE.UU. se podría prolongar la edad de escolarización obligatoria y conceder a los estudiantes un sueldo (como se hace en Suecia), para que sean menos quienes han de ponerse a trabajar.

Del TEIMC se desprende que ideas consideradas a veces necesarias y suficientes para tener buenas escuelas no son ni una cosa ni otra. Indicaciones éstas que resultan más ilustrativas que el puesto logrado. Entre las naciones mejor puntuadas hay varias en las que los estudiantes tienen menos tareas para hacer en casa que sus homólogos norteamericanos, y sus clases, en cambio, son más numerosas. El tiempo lectivo de las ciencias y las matemáticas no es mayor; en algún caso, incluso es menor. En pocos países los alumnos se reparten en niveles de “rápidos” y de “rezagados”, clasificación habitual entre nosotros. Y sus escuelas utilizan menos recursos técnicos que las estadounidenses.

Los libros de texto, en cambio, sí parecen tener importancia. Los investigadores del TEIMC analizaron algunos de los 800 textos de ciencias o matemáticas de uso más común en los países participantes. Con pocas excepciones, los textos norteamericanos tocaban muchos más temas que los de otros países, e insistían en ellos una y otra vez. “Los escolares estadounidenses van logrando pequeñas mejoras desde cuarto a octavo grado en todas las áreas examinadas, pero no mejoran mucho en ninguna”, afirma Schmidt. “Y en secundaria, la tendencia continúa inalterable.”

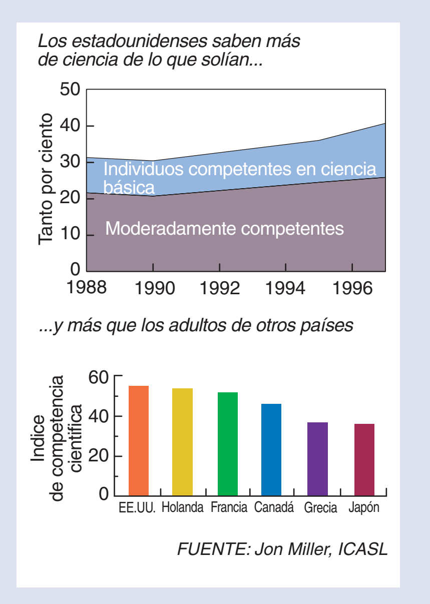
Ignaros, pero no más

A pesar de la jeremíaca retórica, los exiguos datos disponibles señalan que la cultura científica de los estadounidenses va a mejor. Encuestas bienales coordinadas por Jon Miller revelan que, desde 1985, el conocimiento científico ha aumentado en la población adulta (*gráfico superior*) y que el intervalo de 18 a 29 años de edad logra en las encuestas resultados algo mejores que los mayores de 40. También las puntuaciones de los jóvenes de 17 años en la evaluación nacional de progresos en ciencias y en matemáticas han ido subiendo lentamente desde 1982, si bien son todavía inferiores a las máximas alcanzadas en los años finales del decenio de 1960.

Los alumnos de Grado 12 pueden ocupar malas posiciones en los tests internacionales, pero eso no significa que los estadounidenses sepan menos sobre ciencias que los adultos de otros países. De hecho, han demostrado sistemáticamente poseer ideas más claras sobre hechos de ciencia básica que los moradores de muchos países que superaron a EE.UU. en el TEIMC (*gráfico inferior*). Miller atribuye los buenos resultados de EE.UU. a sus elevadas tasas de estudiantes universitarios, más altas que en otros países. Además, la probabilidad de que los estudiantes universitarios norteamericanos sigan cursos de ciencia general es también mayor.

Mas, aunque los adultos conozcan más ciencia de escuela secundaria que la mayor parte del mundo, su ignorancia deja atónito. La mayoría, por ejemplo, no logra recordar la definición de año (*abajo*).

—*D. F.*



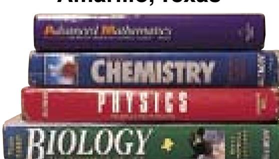
PREGUNTAS DE LA ENCUESTA DE CULTURA CIENTIFICA:

1. ¿Qué es una molécula? (11 por ciento de respuestas correctas)
2. ¿Qué es el ADN? (22 por ciento)
3. ¿Funcionan los láseres enfocando ondas sonoras? (39 por ciento)
4. ¿Cuánto tarda la Tierra en dar una vuelta alrededor del Sol? (48 por ciento)

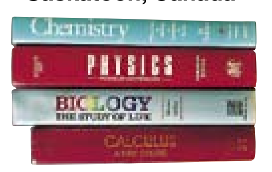
Así pues, los adolescentes norteamericanos puntúan un poco menos que sus homólogos de otras naciones en un extenso cuestionario, cuyas preguntas son casi todas de elección múltiple y están centradas en hechos y procedimientos básicos. Bueno, ¿y qué? “No estoy convencido de que lograr puntuaciones altas en el TEIMC equivalga a ser científicamente letrado”, opina Angelo Collins, experto en normas de enseñanza de las ciencias. J. Myron Atkin coincide con él. “Los cuestionarios no reflejan la capacidad de resolución de problemas a largo plazo, ni prestan atención a los conceptos sobre la naturaleza de las ciencias”, afirma. “Los esfuerzos por elevar las puntuaciones en el TEIMC suponen un paso atrás, porque esas pruebas no tienen que ver con lo que deseamos que sepan nuestros jóvenes.”

En opinión de Hurd, los cursos preuniversitarios de ciencias han servido siempre de filtros eliminatorios,

Amarillo, Texas



Saskatoon, Canadá



Umeå, Suecia



3. LOS TEXTOS ESCOLARES de los EE.UU. suelen tocar reiteradamente muchos temas, pero pocas veces lo hacen con profundidad.

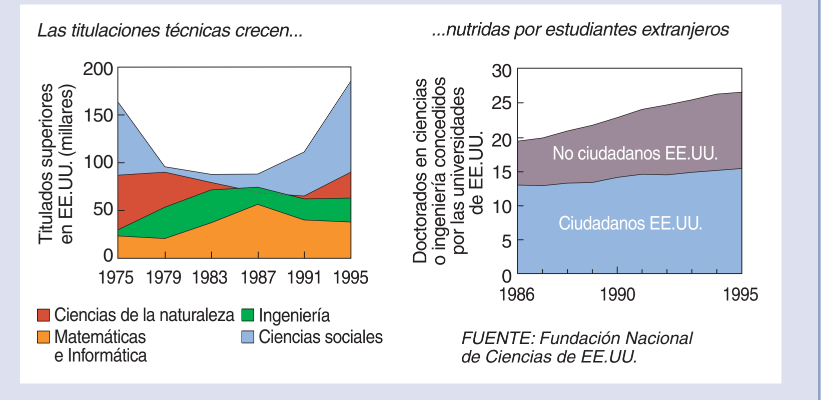
No hay crisis en la investigación norteamericana

Se halle como se halle la enseñanza secundaria en matemáticas y en ciencias, los departamentos universitarios que generan para los EE.UU. el cuerpo de elite de científicos e ingenieros no sufren penuria de buenos alumnos brillantes (*a la izquierda*). La cosecha anual de doctores en ciencias y en ingeniería se ha disparado un 130 por ciento desde 1966, mientras que la población estadounidense aumentó sólo un 35 por ciento. Unas disciplinas han tenido más suerte que otras. Así, la matrícula en programas de doctorado en física ha caído un 27 por ciento respecto a 1992. Pero según Patrick J. Mulvey, tal descenso sólo refleja la escasa demanda laboral en disciplinas relacionadas con la defensa, tras la guerra fría.

En otros campos, las previsiones temen más la riada que la sequía de nuevos científicos. En el año 1998, un informe del Consejo Nacional sobre Investigación apremiaba a las universidades para que congelasen, por esta precisa razón, el tamaño de sus programas de posgrado en biología.

En parte, el mayor número de doctorados en los EE.UU. es fruto del aumento sistemático de estudiantes extranjeros (*a la derecha*). Tras su graduación, buena parte de éstos, en una proporción creciente, se queda a trabajar en los EE.UU. En 1996, alrededor del 68 por ciento de los ciudadanos extranjeros que se doctoraron en ciencias o en ingeniería tenían la intención de vivir en los EE.UU., frente al 49 por ciento de 1980.

—*D.F.*



En demanda: Intelectos potentes

"Cuando la economía va mal, la culpa siempre recae en las escuelas", observa J. Myron Atkin, de la Universidad de Stanford. "Cuando va bien, nunca se nos atribuye el mérito."

No le falta razón. Dos análisis independientes de la competitividad económica global situaron este año a los EE.UU. en primero o segundo lugar (tras Singapur). Y sin embargo, uno de los autores de uno de los informes, Michael E. Porter, economista de Harvard, advertía que "aunque los EE.UU. son hoy muy competitivos y están lanzando innovaciones a un ritmo febril, los autores de tales innovaciones se graduaron en la universidad hace de cinco a veinte años."

Y concluía Porter: "El problema principal que afrontan los EE.UU. para impulsar la innovación es una crisis cada vez mayor en ciencia y en personal técnico." Tanto Porter como Jeffrey Sachs, también de Harvard, citaron como sospechosas principales a las escuelas públicas del país.

Son muchos quienes consideran axiomático que las destrezas matemáticas y científicas de los graduados de secundaria son de importancia crítica para la salud de la economía. Esta presunción queda contradicha por diversas pruebas. Para empezar, los minuciosos análisis microeconómicos de Porter y otros, base de los informes de competitividad, enumeran docenas de variables con posible influencia en la capacidad de un país para triunfar en la economía global, que van desde la política comercial hasta el celo de la fiscalía antimonopolio. La idoneidad escolar está bastante abajo en la lista, por detrás de la calidad de la infraestructura portuaria, si vale el ejemplo. La "calidad de científicos e ingenieros" ocupa un lugar más bajo aún. Ambas variables figuran entre las más difíciles de cambiar por los políticos.

Además, la producción universitaria de científicos e ingenieros ha ido aumentando, pese a la competencia que le plantea un mercado laboral pujante y el descenso de la población de edad comprendida entre 20 y 24 años. Nadie puede pronosticar si los recién graduados serán tan productivos como sus predecesores. Pero resulta interesante señalar que muchos innovadores que dejaron la universidad "hace de cinco a veinte años" se formaron durante la "crisis" en la educación científica de comienzos de los ochenta.

Anthony P. Carnevale plantea una tercera cuestión. "Puede que la técnica sea el principal ingrediente de la tarta económica, pero eso no significa que la tarta vaya a ser repartida en empleos técnicos", sostiene. Técnicas nuevas basadas en la electricidad, el aluminio, los automóviles y el rayón han creado algo de empleo para especialistas, apunta Claudia Goldin, de la Universidad de Harvard. Pero su fruto principal ha sido generar empleo en el sector de servicios, y acentuar la demanda de cultura general y aritmética.

Los avances en técnica de la información ejercen un efecto similar, opina Carnevale. Entre 1959 y 1997, en los EE.UU. ofreció cinco veces más puestos de trabajo administrativo que cargos técnicos. Partiendo de un examen detallado de estadísticas extraídas del censo, Carnevale llegó a la conclusión de que no más del 13 por ciento de los estadounidenses necesitan matemáticas superiores (como la trigonometría o el cálculo diferencial) en su trabajo. En cambio, alrededor del 57 por ciento de ellos precisan de una elevada capacidad de razonamiento verbal o analítico.

Hay muchas maneras de enseñar a razonar, señala Carnevale. "Antes era el latín; esa función la cumplen ahora las matemáticas. Pero es la elevada capacidad de razonamiento general lo que cada vez se demanda más, y no el específico." De ser así, la instrucción tradicional en ciencias y en matemáticas, con su hincapié en la memorización de hechos y procedimientos, está prestando dudoso servicio a los estudiantes.

Siendo las tasas de ocupación laboral del 96 por ciento, resulta inevitable la escasez en ciertas destrezas técnicas muy de última hora. Pero la reforma de la escuela pública es un camino lento e incierto para remediarla. Además, como señala William Aspray: "Cuando los departamentos de personal piden candidatos con tres años de experiencia en técnicas que sólo cuentan 18 meses, está claro que no van a encontrarlos."

—*W.W.G.* y *D.F.*

para seleccionar a los alumnos más brillantes e inquietos. “Los capaces de memorizar la jerga y las fórmulas, progresan”, abunda Atkin. “Son cursos de preparación para estudios posteriores, no para la vida real.”

En la práctica, la oferta de científicos e ingenieros está controlada por las universidades, no por las escuelas secundarias. De los 305.000 estudiantes que siguieron cursos introductorios de física de nivel universitario en 1988, sólo un 1,6 por ciento continuó hasta graduarse en esa disciplina. De la cosecha se espigaron apenas 700 doctorados. En opinión de Glen S. Aikenhead, si en los EE.UU. hacen falta más científicos, la solución más rápida y segura consiste en eliminar un número menor de estudiantes universitarios que aspiran a serlo.

Existen, además, buenas razones, para poner en tela de juicio que las ciencias enseñadas en los institutos y colegios influyan gran cosa en la productividad o en la competitividad económica. Y de ser cierto que la educación científica es una palanca floja e inadecuada para potenciar la investigación o para impulsar la economía, resultaría que una gran parte de las ciencias y las matemáticas que las escuelas se esfuerzan en enseñar carece de sentido.

Aikenhead añade: “Cuando hemos reflexionado sobre los conocimientos de ciencias necesarios para tomar las decisiones que los adultos han de tomar —trátese de jueces en los tribunales, de políticos en comisiones de planificación, de personas pobres que han de economizar en su consumo de energía o de familias cuyos hijos sufren problemas médicos especiales—, lo que hemos visto es que la ciencia abstracta, idealizada, no tiene la menor utilidad.”

La falsa crisis de la enseñanza de las ciencias enmascara la triste realidad de que a la inmensa mayoría de los estudiantes se les enseña una ciencia alejada de sus vidas. La inercia de los científicos constituye una parte importante del problema. “Muchos creen que el sistema es adecuado, pues fueron producidos por él”, opina William F. McComas.

Hurd, por su parte, considera que la escuela ha de proporcionar destrezas de razonamiento crítico “para distinguir de la propaganda lo respaldado por pruebas, la probabilidad de la certeza, las convicciones racionales de las supersticiones, los datos de las presunciones, la ciencia de la sabiduría popular, la teoría de la declaración”. Y entre oportunidad y crisis.

Seis etapas hacia la competencia científico-matemática

Nuestra revista ha solicitado a especialistas en enseñanza de las ciencias que propongan métodos factibles y probados para mejorar en colegios e institutos dicha instrucción. He aquí algunas de sus respuestas.

1 Sustituir la memorización por la exploración y la inventiva. *Arthur L. White, de la Asociación Nacional para la Investigación en Pedagogía de las Ciencias*

La enseñanza tradicional de las ciencias sigue tres pasos. Primero, los docentes utilizan libros de texto y explicaciones propias para presentar términos y conceptos nuevos. Después, resuelven problemas tipo en la pizarra y proponen nuevos ejercicios. Por último, entregan hojas de instrucciones para realizar experimentos controlados en el laboratorio, cuyo resultado el alumno suele conocer de antemano.

Pero la investigación y la experiencia han revelado que esta técnica presenta deficiencias graves. El problema, en su raíz, estriba en que los niños, al serles presentada nueva información, la relacionan con otras cosas de distinto modo que los adultos. Le decimos a un niño: “La densidad es igual a la masa dividida por el volumen”, y el niño intenta de inmediato relacionarla con experiencias suyas propias, de primera mano: la “masa” puede ser la de hacer rosquillas, el “volumen”, un mando de la radio o la televisión. Y a lo mejor “denso” le hace pensar en algo espeso o viscoso. El niño acaba frustrado y aburrido.

Sabemos ahora de un método mejor, el llamado ciclo de aprendizaje. También consta de tres fases. Pero la experimentación es lo primero, y los estudiantes son animados a explorar cualesquiera fenómenos que deseen. Después, el profesor les ayuda a descubrir regularidades en los datos y a inferir hipótesis acerca de las reglas subyacentes. Sólo entonces el profesor asigna vocablos y etiquetas a lo que los chicos han observado e inventado. El paso final, y crítico, consiste en aplicar los conocimientos mediante trabajos de campo, nuevos experimentos, problemas verosímiles, lecturas y demás medios de vincular el nuevo conocimiento con lo que el alumno toma por “vida real”.

Los estudiantes que aprenden por este método retienen más sobre lo enseñado, miran las ciencias con más entusiasmo, realizan mejor las tareas de razonamiento abstracto y resuelven con mayor destreza los problemas de la ciencia real.

2 Centrarse en el currículo de secundaria superior. *William H. Schmidt, coordinador del Tercer Estudio Internacional de Matemáticas y Ciencias (TEIMC)*

Los resultados del TEIMC han confirmado una vieja crítica contra escuelas e institutos: sus temarios tienen un kilómetro de anchura y un dedo de profundidad. Con pocas excepciones, las escuelas estadounidenses se esfuerzan en abarcar más temas que las de otros muchos países. Es también más probable que los maestros repitan una y otra vez la misma información de un grado al siguiente, sin profundizar.

La competencia científica de la población podría mejorar si la instrucción abarcase menos y se centrara



LAS INVESTIGACIONES EN EL MUNDO REAL, que permiten a los jóvenes verificar sus propias teorías, son lo mejor para aprender ciencias, según muchos especialistas.

en los conceptos esenciales. Habría así tiempo para proyectos de larga duración, que dieran a los jóvenes una comprensión mejor de lo que es la ciencia fuera de la clase de laboratorio.

En una escuela de secundaria superior de la península de San Francisco, por ejemplo, los estudiantes de biología catalogaron la fauna y la flora de unas marismas que iban a ser recalificadas. Los estudiantes tuvieron que concretar sus preguntas consultando a funcionarios locales, plantear una estrategia de investigación, realizar el trabajo de campo, sistematizar los datos y presentar sus resultados al concejo municipal. El proceso les sirvió para aprender sobre diversidad de organismos, la vida que podrían sostener los distintos nichos ecológicos y otras muchas cosas. Y todo ello, con mucha mayor profundidad de la posible por medio de un libro o de explicaciones verbales.

Los organismos consultivos en cuestiones de educación nacional proponen un núcleo de hechos e ideas que cada niño puede y debe asimilar, acordes con las líneas preponderantes en la investigación y tras años de debate entre los científicos, los docentes y el público. Algunos estados y distritos escolares se han basado en estos documentos al diseñar sus propias normativas curriculares. Debería secundarse su ejemplo.

---

3 Seleccionar los textos de matemáticas atendiendo a lo importante. *Gerald Kulm, director del Proyecto 2061, de la Asociación Americana para el Fomento de la Ciencia*

La elección del texto que se va a utilizar es una de las decisiones principales que competen a los profesores de matemáticas. Una de las más difíciles, también. Los textos, extensísimos, pecan de repetitivos; obsesionados por el vocabulario y los procedimientos computacionales, garantizan que serán muchos los niños que nunca adquirirán los conceptos matemáticos que precisen cuando alcancen la madurez.

Con demasiada frecuencia, la elección de los libros de matemáticas obedece a su buena presentación y al cumplimiento de ciertos requisitos superficiales. El Proyecto 2061 ha analizado con rigor los contenidos y la calidad propedéutica de más de una docena de textos de matemáticas de grado medio. Sólo cuatro han merecido una cálida aprobación.

---

4 Eliminar los niveles de rezagados. *Robert M. Hauser, profesor de sociología, Universidad de Wisconsin-Madison*

En los Estados Unidos, las escuelas tienden a distribuir a los niños en clases de avanzados, normales y rezagados, sobre todo, en matemáticas y en ciencias. Basándose no pocas veces en tests estándar —con frecuencia, inadecuados— la mayoría de las escuelas elementales enseñan material diferente a los distintos grupos de alumnos, al menos, durante parte de la jornada. Esta práctica es aún más explícita en las escuelas secundarias. A consecuencia de ello, más de una cuarta parte del alumnado se queda sin tratar con cierta seriedad la física.

En un reciente informe publicado por el Consejo Nacional de Investigación, el autor y otros citaban pruebas convincentes de que en los niveles de rezagados se hacía mucho menos hincapié en el conocimiento abstracto y en otras destrezas intelectuales que guardaran fuerte correlación con el éxito futuro de los alumnos. En teoría, las clases de recuperación ayudan a los rezagados a ponerse al día. Pero los estudios han descubierto que las clases de rezagados suelen tener currículos deficientes, expectativas bajas y profesores ineficaces, por lo que la disparidad entre avanzados y rezagados crece con el tiempo.

---

5 Evaluar el rendimiento, no la regurgitación. *J. Myron Atkin, presidente de la comisión de educación científica de la Academia Nacional de Ciencias, K-12*

En las escuelas públicas, los cursos de ciencias insisten en la memorización. Conceden poca atención a la comprensión profunda de los principios o a la forma de operar de las ciencias. La avalancha de exámenes de ámbito estatal, que son una forma de poder exigir responsabilidades a las escuelas, ha agravado el problema, como lo ha hecho el TEIMC. Es hecho bien probado que si los exámenes tienen consecuencias, los profesores enseñan en función de los exámenes.

Las escuelas deberían, en cambio, evaluar el rendimiento académico de los estudiantes atendiendo a su destreza en tareas acordes con los objetivos del currículo. Podrían también calificar en función de informes, exposiciones y experimentos que reflejen los objetivos del curso.

Por sí misma, la preparación de exámenes en nada ayuda a comprender mejor la ciencia; en ciertos casos incluso es contraproducente. Otros tipos de pruebas, empero, sí podrían contribuir a mejorar el aprendizaje. Escuelas de Pasadena, Seattle, Anchorage y otros puntos han descubierto que, cuando los profesores dan a los alumnos realimentación frecuente —no en forma de preguntas, sino de conversaciones—, éstos consiguen enjuiciar mejor su rendimiento y el de los demás. Si los alumnos perciben de una forma clara qué tienen que aprender y qué les queda todavía por asimilar, avanzan más deprisa.

---

6 Partir de las ideas preconcebidas de los alumnos. *Senta A. Raizen, directora, WestEd's National Center for Improving Science Education*

Los estudiantes no entran en la clase de ciencias con ignorancia virginal, sino con ideas muy arraigadas acerca del mundo natural. Los hay convencidos de que ciertos materiales (como la lana) son intrínsecamente calientes, mientras que otros (como el metal) son fríos por naturaleza. Estas creencias erróneas persisten incluso después de una instrucción científica formal en sentido contrario. En un estudio, cuando les fue preguntada la causa de las estaciones, gran número de estudiantes de último año de la Universidad de Harvard respondieron que en el verano la Tierra está más cerca del Sol que en invierno.

Los libros de texto de ciencias suelen afirmar que han tenido en cuenta las ideas preconcebidas de los alumnos. La verdad es que, si llegan a hacerlo, es de forma periférica. Existen potentes estrategias para afrontar las ideas preconcebidas. El primer paso consiste en pedir a los niños que expliciten sus convicciones. Los profesores pueden entonces utilizar algunas de las ideas preconcebidas de los alumnos como punto de partida de experimentos y analizar con ellos por qué las explicaciones científicas encajan mejor.

Al serles proporcionada esta clase de instrucción a los alumnos de sexto grado, obtuvieron unos resultados en problemas conceptuales de física mejores que los alumnos de undécimo y duodécimo grados enseñados al modo tradicional dentro del mismo sistema escolar. Otros ensayos han cosechado éxitos similares. Obviamente, para realizar esta tarea los profesores han de tener una profunda comprensión de su materia. Pero existe ahora un programa informático, llamado *Diagnoser*, que puede dejar al descubierto las creencias de los alumnos sobre los fenómenos físicos y propone actividades para ayudarles a desarrollar una intuición más precisa.

Shawn Carlson

Detección de la gravedad extraterrestre

Aprovecho la mañana de los domingos para dar un paseo a lo largo de un tramo de tres kilómetros del gravímetro más sensible del mundo. La fuerza que ejerce la gravedad del Sol y la Luna sobre mi cuerpo son millonésimas de la que sobre mí ejerce la Tierra. Sin embargo, tan minúscula fuerza ejercida sobre el océano Pacífico alza unas olas lo bastante altas como para azotar con violencia el camino que sigo. No es fácil aislar tales fuerzas en el laboratorio, por muy bien dotado que esté. De ahí mi asombro al enterarme de que Roger Baker, de Austin (Texas), ha desarrollado un aparato capaz de seguir por gravitación las posiciones del Sol y la Luna.

Según una de mis perogrulladas favoritas, el descubrimiento de ayer es hoy un problema de calibración y mañana lo será de parásitos. La máxima se cumple aquí a rajatabla. Ahora hace un año, describí otro invento de Baker capaz de detectar micropulsos en el campo magnético terrestre. Pero incluso esos diminutos efectos magnéticos enmascararían las fuerzas gravitatorias que aquí intentamos medir. De hecho, eliminar todas las influencias espurias es el aspecto más arduo de este proyecto, cuyo éxito depende de la pericia. Así que en este terreno sólo deben adentrarse los aficionados más duchos.

En el aparato de Baker, un imán pequeño y potente flota delicadamente entre dos imanes permanentes. Un ingenioso dispositivo óptico capta los pequeños movimientos debidos a variaciones gravitatorias, actividad sísmica, dilataciones térmicas, pisadas de bebé, etc. Con un circuito de control se contrarresta ese movimiento por ajuste fino de la corriente que pasa por un electroimán. Así, las variaciones de esa corriente siguen a las fuerzas que actúan sobre el imán flotante. Este, el flotador, se contrapesa haciéndolo insensible al movimiento de alta frecuencia. Pero continúa captando las pequeñas señales oscilatorias debidas a terremotos (con ondulaciones de unas pocas decenas de hertz) y al cambio de posición de la Luna conforme nuestro planeta gira en torno a su propio eje. Baker se propuso en un comienzo construir un sismógrafo de movimiento vertical.

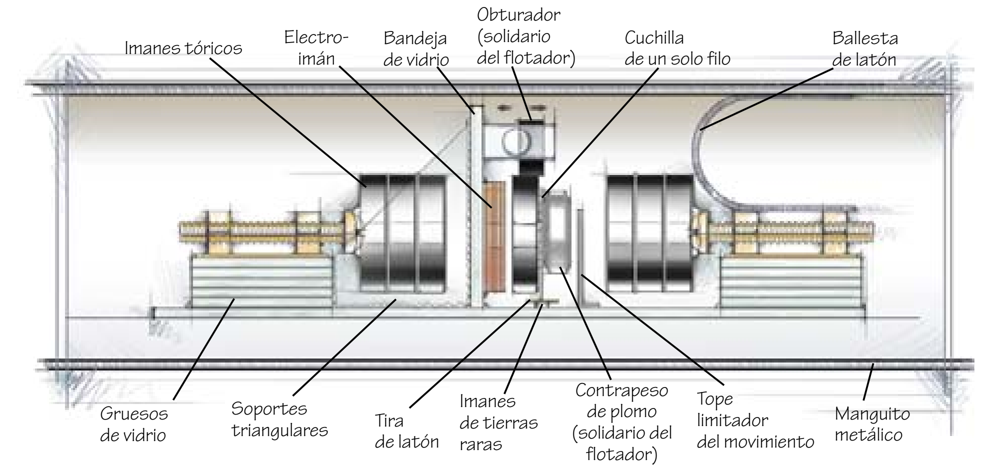
La sensibilidad del instrumento se funda, en buena medida, en el sensor óptico. Para monitorizar la posición del flotador, se sirve de un obturador opaco que bloquea parte de la luz procedente de un diodo emisor de luz (LED) para que no llegue a un fototransistor situado a unos pocos milímetros. Cuando se mueven el flotador y el obturador, varía rápidamente la señal luminosa; unos desplazamientos en la posición del orden de un nanómetro producen un efecto perceptible.

En las ferreterías suelen vender imanes cerámicos en juegos de cinco. Nos haremos con dos juegos. Se apilan seis de ellos en dos grupos de tres y se pegan con epoxia a tornillos (*véase la figura 2*). El séptimo servirá de flotador; los otros tres no hacen falta. Baker impide los movimientos laterales del flotador sujetándolo a una cuchilla de afeitar de acero. El filo de ésta se apoya en una placa de latón sobre el costado del soporte del instrumento. Dos imanes de tierras raras (pieza n.º 64-1895, Radio Shack) tras la placa fijan el filo de la cuchilla al latón. Una leve aplicación de aceite sobre la cuchilla crea una articulación casi lisa que permite al flotador balancearse arriba y abajo, pero no de lado a lado. Finalmente, Baker le sujeta un plomo de pescar de 28 gramos para rebajar su frecuencia natural y baja el pequeño obturador opaco para detectar su posición.

Aunque el armazón del gravímetro puede construirse con cualquier material amagnético, Baker recomienda vidrio de ventana por su escaso precio, poca dilatación térmica y facilidad de montaje. Corta las placas con una cuchilla de vidriero de rueda de carburo, de modo que encajen entre sí sin intersticios; afianza luego la



1. Gravímetro mostrado sobre la carcasa metálica. Para funcionar, el dispositivo se introduce en el cilindro, un tubo de hierro recubierto de una aleación de cobre, níquel y hierro que lo aísla del campo magnético terrestre. Las resistencias encoladas al exterior de la carcasa actúan de calefactores que mantienen constante la temperatura del instrumento



2. El gravímetro de Baker, cuya sección transversal horizontal se muestra, registra movimientos pequeñísimos debidos a efectos gravitatorios. (En la práctica, el aparato se monta verticalmente.)

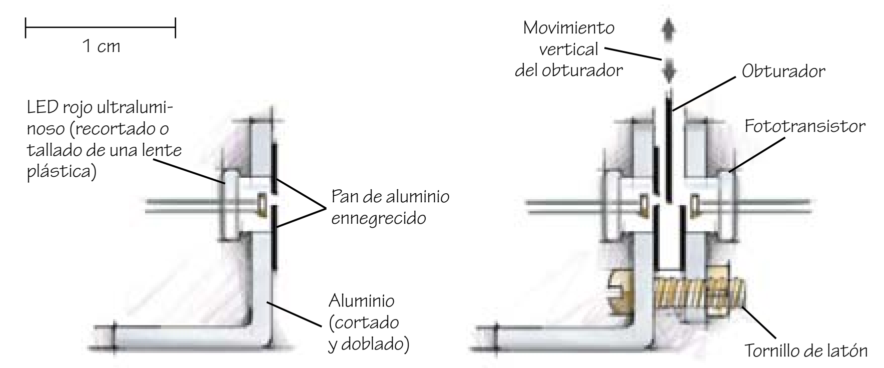
estructura con soportes de vidrio triangulares. Con silicona une las piezas. Los errores son de fácil remedio, ya que las partes pueden separarse con una cuchilla de afeitar.

Para construir el electroimán, Baker enrolla una bobina utilizando como guías dos de los imanes sobrantes. Se recubre un lápiz con cinta enmascarante hasta que los imanes se deslicen por él sin huelgo. Cubre con más cinta los imanes, que se colocan sobre el lápiz a una distancia mutua de más o menos un diámetro de imán. Seguidamente se encinta uno de los extremos de alambre magnético esmaltado del 30 (n.º de pieza 278-1345B, Radio Shack) al borde de uno de los discos y se comienza a enrollar el alambre entre ambos. El alambre se mantendrá con una tracción de 50 a 100 gramos y se irá cubriendo de epoxia conforme avanza la tarea. No hay que detenerse hasta que el borde de la bobina esté a unos dos milímetros por debajo de los bordes de los imanes. Secada la epoxia, se hornea el conjunto a baja temperatura para desprender el adhesivo de la cinta enmascarante; luego, se separa la bobina desnuda. Esta, acabada, debe tener unos 0,5 cm de largo y 2,7 cm de diámetro. Su resistencia en corriente continua debe ser de unos 10 ohms.

El sensor de posición óptico reclama cierto cuidado. Puede emplearse un LED rojo ultraluminoso (n.º de pieza 276-066B, Radio Shack) y un fototransistor (n.º de pieza 276-145A), pero hay que eliminar las cápsulas externas para acercar entre sí los elementos activos, lo más que se pueda. Se eliminan las cápsulas amolándolas, dejando los microcircuitos al aire; después, se pulen los bordes con un pulidor de grano fino. Una combinación de dentífrico con un buen ritmo de brazo aplicada con el reverso de un trozo de madera blanda da buen resultado. Los elementos de circuito se instalan en sus monturas con silicona (*véase la figura 1*). Ahora, con un marcador de punta de fieltro, se ennegrecen tres pequeños trozos de pan de aluminio. Se pegan dos de éstos con epoxia al LED, de modo que formen una rendija horizontal estrecha; las rendijas de Baker miden medio milímetro de ancho. Con el tercer trozo se obtura la mitad inferior del fototransistor. Este truco afina la sensibilidad del aparato al provocar que la señal caiga rápidamente a cero cuando el obturador corta el estrecho haz emergente de la rendija. El resto del instrumento se ensambla como se muestra.

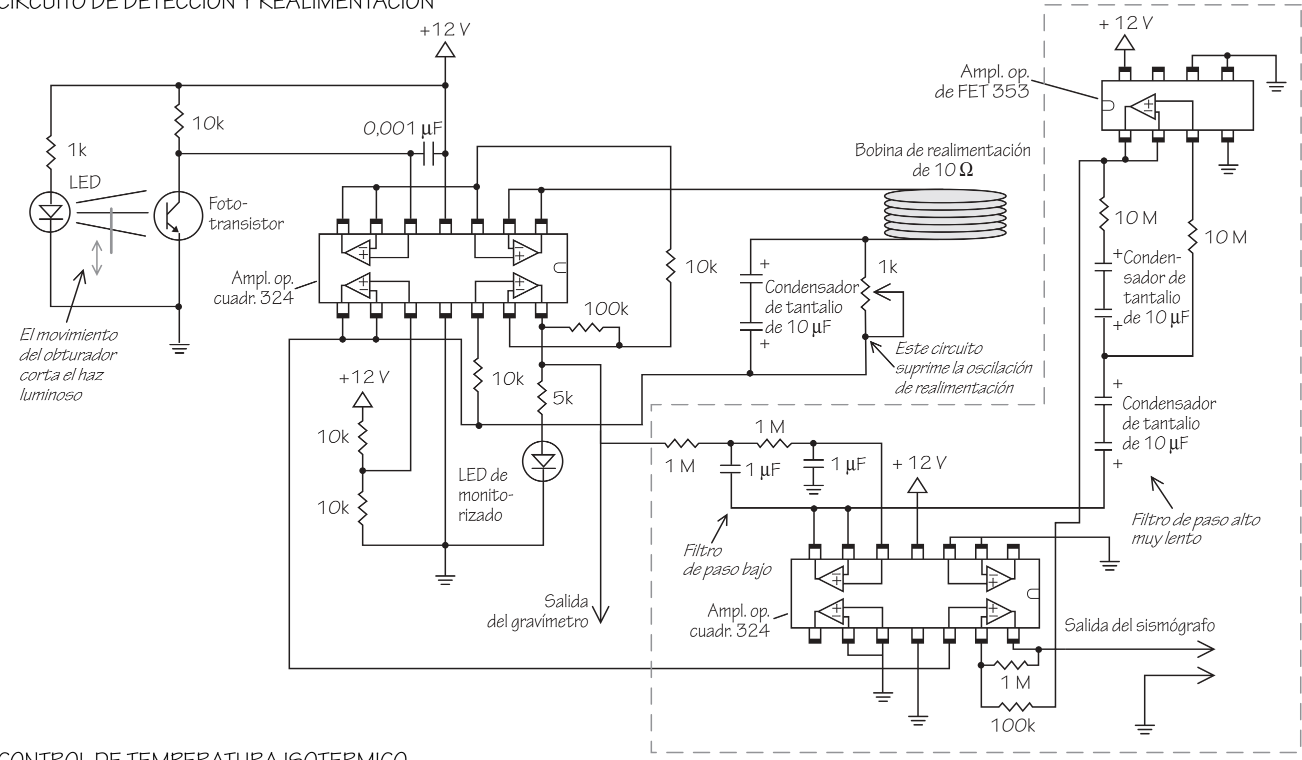
Igual que sucede con la instrumentación delicada, el gravímetro de Baker produce resultados falsos si cambia su temperatura. Para salir al paso a ese inconveniente, controló la temperatura. Con ese fin instaló el detector dentro de un manguito metálico, que mantuvo a unos 10 grados Celsius por encima de la temperatura ambiente, empleando veinte resistencias de 50 ohms y 1/2 watt como pequeños calefactores. Detectaba la temperatura con un termistor de Radio Shack, la salida del cual comparaba con una tensión de punto de rocío ajustable, determinada con un potenciómetro. En este caso, un circuito deja pasar corriente por las resistencias siempre que la señal del termistor sea inferior al punto de rocío y la corta cuando la señal supera dicha cota. El montaje, por simple que sea, mantiene constante la temperatura dentro de unos límites de algunas centésimas de grado Celsius.

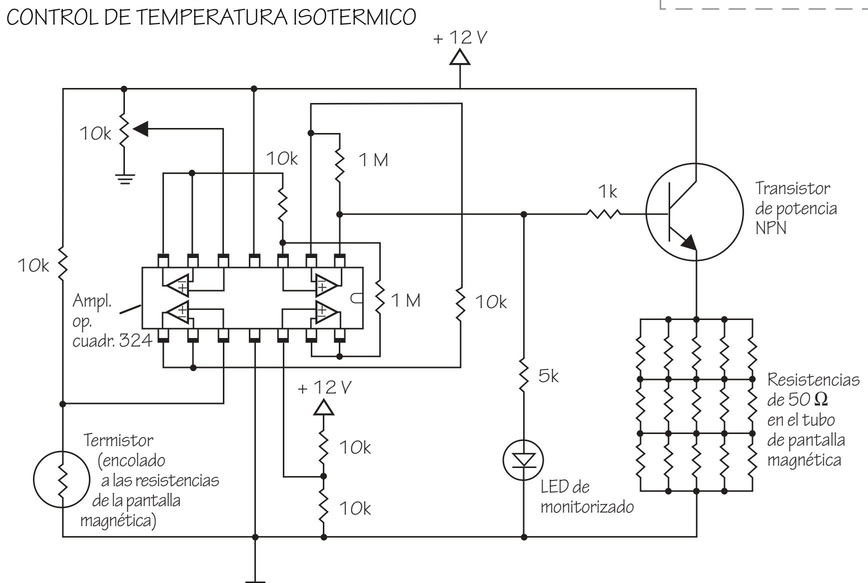
El manguito metálico sirve, asimismo, para apantallar el aparato frente al magnetismo terrestre. Consiste en un tubo de agua de hierro, de unos ocho centímetros de diámetro y unos veinte centímetros de longitud, recubierto con capas arrolladas de una aleación de cobre, níquel y hierro, u otra aleación de gran permeabilidad magnética, con intercalación de cartón u otro material no magnético. En cualquier caso, el apantallamiento debe prolongarse al menos una distancia de dos diámetros de tubo por encima y por debajo del detector, para atenuar los campos magnéticos que penetren por sus bocas abiertas.



3. El sensor óptico, que puede detectar cambios de posición nanométricos, se compone de un LED (izquierda) *enfrentado a un fototransistor, con un obturador opaco que corta el haz luminoso que va del primero al segundo* (derecha). *El haz atraviesa una ranura estrecha del pan de aluminio*

Para monitorizar las fuerzas actuantes sobre el detector, hay que conectarlo a un ordenador. Baker emplea el convertidor analógico-digital WinDAQ (www.datq.com), que funciona con el sistema operativo Windows. Conviene que los aficionados a MacIntosh prue-





4. El circuito sensor y de control (arriba) *detecta los minúsculos movimientos del obturador y ajusta la corriente en la bobina de realimentación para compensarlos. Si queremos emplear el instrumento como sismógrafo hay que añadir los filtros, tal como se indica. El circuito de control de temperatura* (sobre estas líneas) *puede mantener la temperatura del sensor dentro de un margen de una centésima de grado Celsius*

ben el Serial Box Interface de Vernier Software (www. vernier.com). Hay más opciones. Para esta aplicación, el ordenador debe mostrar los datos en forma de grabadora de banda, representando la tensión entre los bornes de la bobina en función del tiempo.

Instálese el instrumento verticalmente sobre una base estable. Asiéntese ésta sobre un bloque de cemento y lo más lejos posible del tráfico automovilístico. Dése corriente y espérese a que se calienten los calefactores. Retírese entonces el aislante de la parte superior y ajústese el tornillo que hace subir y bajar el imán superior, a la vez que se observa la salida y se determina la posición para la cual la señal del fototransistor justo empieza a verse. Es ésta una operación delicadísima. En ese momento, un suave movimiento puede hacer que la señal aparezca o desaparezca. El flotador se agitará naturalmente arriba y abajo a una frecuencia aproximada de un segundo, evidenciable en un osciloscopio. Repóngase el aislante.

Para los ajustes finos, colóquese encima un imán cerámico y muévasele hasta que la señal del fototransistor empiece a atenuarse. Entonces, el instrumento funcionará durante semanas con sólo algunos ajustes ocasionales del imán externo para mantener su alta sensibilidad. Quien se ocupe de la gravedad extraterrestre, deberá ver una onda senoidal lentamente variable en fase con las mareas locales. La detección será menos ambigua para quien viva lejos de la costa; ni el embravecimiento de la playa ni otros efectos secundarios han de contribuir a la señal. Los gravitacionistas ambiciosos pueden acometer la transformación de Fourier de los datos y buscar la potencia en exceso para un período aproximado de 24 horas y también a los 28 días.

Se encontrará más información acerca de este proyecto en el sitio Web de Roger Baker en www.eden.com/~rcbaker. Envíense, por favor, las preguntas directamente a la Society for Amateur Scientists a través de la discusión subsiguiente en earth.thesphere.com/sas/WebX.cgi.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

Teoremas de imposibilidad

En el lenguaje ordinario, al decir que algo es imposible, solemos dar a entender que no vemos ninguna forma de conseguir tal objetivo. En el pasado, muchos tuvieron por imposible que máquinas más densas que el aire pudieran volar; antes aún, fueron muchos los convencidos de que jamás podrían flotar sobre el agua máquinas más densas que ella. El ingenio humano ha conseguido vencer estas aparentes imposibilidades en muchas ocasiones.

En matemáticas, empero, la imposibilidad sí es demostrable. Podemos demostrar que 3 no es una potencia entera de 2. Una de las formas consistiría en preguntar qué potencia de 2 podría ser igual a 3 y observar que el exponente 1 es demasiado pequeño ($2^1 = 2$) mientras que el exponente 2 es demasiado grande ($2^2 = 4$). Las demostraciones de imposibilidad, sin embargo, funcionan en el mundo de las matemáticas sólo en la forma concreta en que éste quede establecido: cambiando las reglas del juego pueden ocurrir cosas diferentes. En el conjunto de los enteros "módulo 5" todos los múltiplos de 5 se consideran iguales a 0 y cualquier número mayor que 5 es convertido en el resto de su división por 5. Con estas reglas, ($3 = 2^3$). Tal cosa no quiere decir que la declaración de imposibilidad anterior sea falsa, porque se ha modificado el contexto; sólo quiere decir que se ha de tener cuidado y definir de qué se está hablando.

La capacidad de las matemáticas para demostrar que ciertas tareas son imposibles tiene un efecto secundario harto irritante. Supongamos que después de pasarme los 10 últimos años llenando de cálculos un cuaderno tras otro, me convenzo de que he descubierto un nuevo número primo, de varios millares de dígitos de longitud. Sin embargo, a diferencia de todos los demás números primos conocidos, mi número primo es par. Su última cifra, en la notación decimal ordinaria, es un 6. Con emoción indescriptible ante hecho tan sorprendente, envío mi trabajo a un matemático, quien me lo devuelve en el acto, calificándolo de absurdo. Y lo que es peor, cuando le pregunto en qué me he equivocado, responde que no ha leído mi trabajo y que no tiene la menor idea de dónde está el error, pero que con certeza ha de haber alguno. Me ha dejado atónito. ¡Menuda arrogancia!

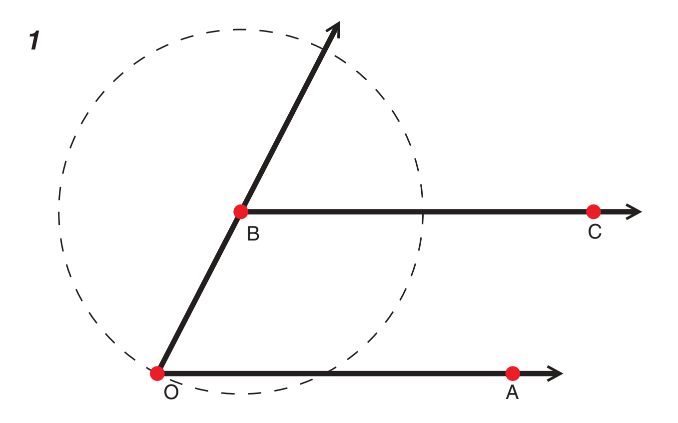
En casi todas las facetas de la vida, sin duda lo sería. Pero en matemáticas, se trata de una simple aplicación de la lógica. El único número primo y par es el 2. No existe ningún otro.

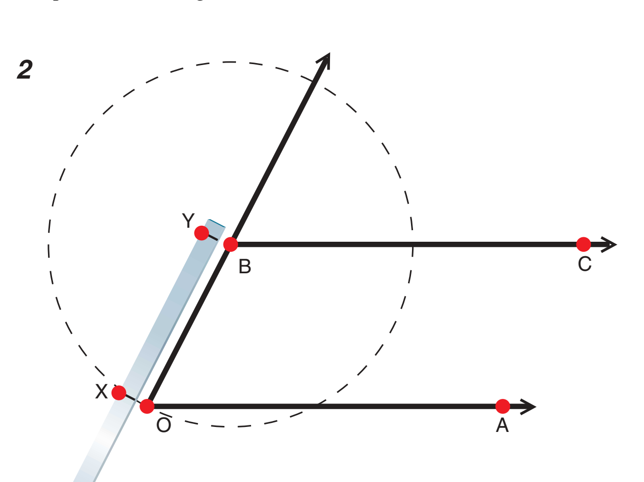
Uno de los más profundos teoremas de imposibilidad fue dado a conocer a comienzos del siglo XIX por Niels Henrik Abel y Evariste Galois. Uno y otro, utilizando métodos distintos, demostraron que la ecuación general de quinto grado no puede ser resuelta mediante una fórmula que sólo utilice las operaciones ordinarias del álgebra y la extracción de raíces; vale decir, raíces cuadradas, cúbicas, cuárticas, etc. Matemáticos anteriores habían descubierto fórmulas para resolver mediante radicales ecuaciones menos complicadas: la conocida fórmula cuadrática resuelve las ecuaciones de segundo grado, y existen expresiones similares para las ecuaciones de tercero o cuarto grados. Pero todos los esfuerzos encaminados a encontrar una fórmula similar para ecuaciones de quinto grado fracasaron. Abel y Galois pusieron punto final a ese tipo de tentativas al demostrar que jamás podrían tener éxito.

Para comprender cómo es posible dar demostraciones de este tipo, veamos primero un rompecabezas bien conocido. El tablero de ajedrez tiene 64 casillas. Hay una enorme variedad de formas de pavimentar el tablero con 32 dominós, cada uno formado por dos cuadrados de igual tamaño que los cuadros del tablero. Si eliminamos del tablero dos vértices contiguos, sigue siendo fácil pavimentar el resto con 31 dominós. En cambio, si suprimimos dos vértices diagonalmente opuestos, todas las tentativas de recubrir el tablero con 31 dominós fracasan.

¿Demuestran esos repetidos fracasos que la tarea es imposible? No,

1. La trisección de un ángulo es posible con un compás y una regla marcada. Trácese una circunferencia de centro B que pase por O, y una recta BC paralela a OA (1). *Márquense en la regla los puntos X e Y, de modo que XY = OB* (2). *Hágase deslizar la regla de modo que pase por O, el punto X se encuentre en la circunferencia, e Y se halle sobre BC* (3). *El ángulo AOY es entonces la tercera parte del ángulo AOB*

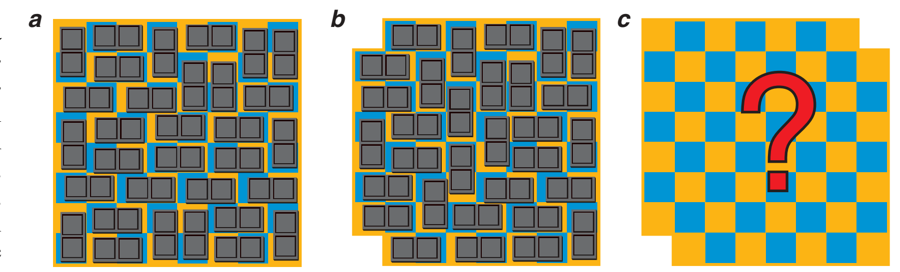




ni aunque pasemos toda una vida intentándolo. ¿Será imposible tal recubrimiento? Sí; he aquí la demostración. Al situar un dominó en el tablero, recubre necesariamente un cuadro blanco y uno negro. Por tanto, en toda pavimentación con dominós, el número de cuadros blancos y el de cuadros negros recubiertos ha de ser el mismo. Así ocurre en el caso de los dos primeros tableros, pero no cuando los cuadros suprimidos se hallan en oposición diagonal, pues entonces son 30 los cuadros de un color y 32 los del otro.

Esta demostración tiene un elemento común con la demostración de Galois para la insolubilidad por radicales de la ecuación de quinto grado. (La demostración de Abel no encaja tan pulcramente en este contexto.) Ambos razonamientos entrañan la introducción de un invariante, de una característica que ha de tener toda posible solución y que puede ser determinada sin conocer la forma detallada de tal solución. En el caso de los dominós, el invariante es sencillo: la igualdad del número de cuadros blancos y negros. En el caso de la ecuación de quinto grado, se trata de una compleja peculiaridad algebraica de las simetrías de las raíces de la ecuación, el grupo de Galois. Si el invariante no se ajusta a las características del problema, cualquier solución que se proponga ha de fracasar. ¡Y podemos saber que así es sin ver siquiera la presunta solución!

Encontramos teoremas de imposibilidad similares en otra región muy popular de las matemáticas recreativas: la construcción de figuras geométricas. En las construcciones más sencillas solamente es lícito utilizar una regla sin marcas y un compás. La construcción parte de cierto conjunto de puntos dados y va determinando, uno tras otro, nuevos puntos, definidos por intersecciones de rectas o de circunferencias. Cualquier recta que se trace ha de unir puntos ya conocidos; todas las circunferencias han de tener su centro en un punto conocido ya y pasar por otro punto también conocido.

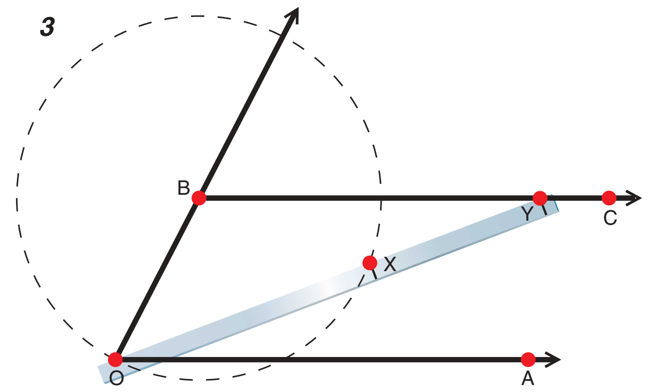


2. Los recubrimientos con dominós son posibles para el tablero de 64 casillas (a) *y, también, para un tablero en el que hayan sido eliminadas las casillas de dos vértices contiguos* (b). *Ahora, ¿será posible recubrir un tablero del que se han suprimido dos vértices diagonalmente opuestos* (c)*?*

¿Qué problemas matemáticos son resolubles mediante tales construcciones? Podemos dividir un segmento rectilíneo dado en un número cualquiera de partes iguales. Podemos también dividir un ángulo cualquiera en dos partes iguales —es decir, bisecar el ángulo— y, repitiendo el procedimiento n veces, dividirlo en 2^n ángulos iguales. Podemos dibujar polígonos regulares de 3, 4, 5, 6, 8, 10 y 12 lados. Todo esto es sabido desde los tiempos de Euclides. A lo largo de los dos milenios siguientes, muchos matemáticos trataron de aplicar el mismo método para resolver otros tres problemas sencillos de plantear:

- Construir un cubo cuyo volumen sea doble del volumen de un cubo dado. (Duplicación del cubo.)
- Dividir un ángulo en tres partes iguales. (Trisección del ángulo.)
- Construir un cuadrado de la misma área que un círculo dado. (Cuadratura del círculo.)

Los tres son imposible de resolver mediante construcciones con regla y compás. Se trata de conseguir soluciones exactas, no meras aproximaciones, pues no es difícil realizar las tres construcciones con el grado de aproximación que se requiera. Y, además, no es lícito utilizar otros instrumentos que una regla sin marcas y un compás. Mediante una regla con marcas no es difícil la trisección del ángulo.



¿Cuál es el invariante en las construcciones con regla y compás? Cualquier construcción de este tipo puede ser representada mediante coordenadas y traducida en el cálculo de una sucesión de números, a saber, las coordenadas de los puntos necesarios. Cada paso de la construcción introduce nuevas coordenadas que están relacionadas con las ya conocidas mediante ecuaciones de primero o segundo grado (de primer grado cuando se trata de intersecciones de rectas; de segundo, si se trata de circunferencias). De aquí se sigue que el "grado" de cualquier punto de la construcción —la ecuación de mínimo grado del cual el punto es solución— ha de ser potencia de 2. Este invariante, el más sencillo de los asociados a las construcciones con regla y compás, es suficiente para probar la imposibilidad del trío de problemas.

La duplicación del cubo equivale a resolver la ecuación $x^3 - 2 = 0$, que es de tercer grado. Dado que 3 no es potencia de 2, no es posible la duplicación del cubo mediante construcciones con regla y compás. La trisección del ángulo es también equivalente a la resolución de una ecuación de tercer grado. (Así resulta de la identidad trigonométrica $\cos 3x = 4(\cos x)^3 - 3\cos x$.) Por esta razón, este problema resulta imposible de resolver con regla y compás.

La cuadratura del círculo es equivalente a la determinación de una ecuación de segundo grado de coeficientes enteros que admita la raíz π. Sin embargo, según un teorema demostrado por Ferdinand Lindemann a finales del siglo XIX, el número π no puede ser raíz de ninguna ecuación de ese tipo, porque π no puede expresarse mediante una secuencia finita de operaciones algebraicas. Este es el modo en que sabemos que es una pérdida de tiempo tratar de resolver los problemas mencionados utilizando una regla sin marcas y un compás.

NEXOS

James Burke

Rodando, rodando

El sujeto sentado en la butaca de al lado, juró de repente en arameo. Nada tranquilizador en cualquier vuelo. Y todo porque se le había derramado la pluma. En mis adentros, acariciando el pequeño bolígrafo con el que me distraía garabateando, hice votos de agradecimiento al húngaro que, sesenta y tantos años atrás, abandonó el hipnotismo y la redacción de una revista para crear el boli. ("Biro", le llaman los ingleses en su honor.) Y como el sorprendente artilugio de Lazlo Biro no gorgoteaba a gran altitud, las fuerzas aéreas aliadas de la Segunda Guerra Mundial los compraron a espuertas para que sus pilotos no tuvieran que navegar hasta un borrón del mapa para luego espachurrarlo.

El chirimbolo de Biro, en el bando de los vencedores, se servía de una bolita de rodamiento para suministrar tinta al papel. El rey de los cojinetes era R. Stribeck, un profesor alemán que unos decenios antes había sometido esferas de metal a todas las iniquidades conocidas para averiguar cómo soportarían las bolas de los rodamientos una vida de trabajo llena de tensiones. Descubrió estridencias de toda suerte, como la importancia de la estría en la que se asienta la esfera. En el mundo de los que fabricaban cualquier cosa que diera vueltas y revueltas, Stribeck era uno de los que de verdad hacían girar la maquinaria.

Lo mismo que quien les explicara el modo de lubricar las esferitas. Era éste un distraído catedrático inglés de nombre Osborne Reynolds. Un chiflado sin remedio. Con cualquier cosa que resbalara, se deslizara o fluyera a finales del siglo XIX, Reynolds hacía números. A él se le ocurrió la idea de que, en función del diseño, había una velocidad crítica a la cual el flujo de aire sobre el ala se volvería tan turbulento, que uno comenzaría a volar como un ladrillo. Reynolds sacó una fórmula que agrupaba los principales factores implicados para evitar tal anatema aerodinámico cuando alguien se estaba construyendo su máquina voladora.

Hablamos, por supuesto, en pura especulación. En aquellos días nadie había volado todavía. Mas se hizo real de la noche a la mañana en Kitty Hawk. Allí el perseverante estudio de los números de Reynolds salvó a los Wright de una caída en picado sobre la arena. (Es curioso, los Wright también trabajaban con rodamientos; para ganarse el sustento atendían una tienda de bicicletas.)

Les advierto, para nada hubiera mencionado siquiera a los hermanos Wright si la vida no hubiera mostrado su cara más vil, dos años antes, a uno de esos individuos que podrían haberse forjado un destino pero no lo hicieron: Wilhem Kress. Lástima por Wilhem, pero no lo encontrarán en los anales de la aeronáutica. Kress era un fabricante de pianos que se pasó a la ingeniería, y en octubre de 1901 este advenedizo austríaco de 68 años (su emperador ofrecía un suculento premio al primer vuelo propulsado) abrió la válvula del gas de su bajel volador triplano y aceleró surcando la superficie de un embalse cercano a Tulln. El acontecimiento... bueno, no hubo tal. Kress nunca se alzó del agua (ni hacia el aire, ni a los libros de historia) porque, un pequeño descuido, su motor pesaba casi el doble de lo especificado. ¡Un pequeño descuido!



Con todo, la consternada compañía Daimler se enmendó cuando le suministró sus motores a otro pájaro. Cuyos esfuerzos no reventaron como los de Kress. No. El conde Ferdinand von Zeppelin reventaba también, pero muy de otra manera. Gracias a los motores Mercedes que impulsaban las hélices de sus aeronaves en la Primera Guerra Mundial, la fuerza aérea alemana podía volar sobre Londres y reducir a escombros algunos sectores impunemente (iban demasiado altos para que les alcanzaran los cazas defensores). Y esos bolsones de gas que volaban a 40 kilómetros por hora hacían bien su trabajo en cualquier condición atmosférica, porque el globo de las aeronaves estaba fabricado de tela recauchutada impermeable, el primer especimen comercial de la cual se había inventado, paradojas de la vida, en Gran Bretaña. La idea de dos lienzos de algodón con una lámina de goma entre ambos la concibió Charles Macintosh, de quien ya he hablado demasiado. Recordaré sólo el nombre de su tío materno, John Moore, arquetipo de hombre de mundo que conoció a media humanidad (como Byron, Federico el Grande y otros).

Afortunadamente para esta columna, Moore también conoció al gran poeta escocés y hombre universal que fue Robert Burns. No puedo resistirme a citar aquí para su deleite un par de versos suyos: "Oh qué gran don el dador nos da / tenernos a nosotros como otros nos han". Tampoco puedo resistirme a la tentación de mencionar que él y Beethoven compartían agente en Londres y que la nieta del agente casó con Charles Dickens (y supongo que aparecerá algún día en esta columna. Demasiado buen nexo como para dejarlo escapar).

Sigamos con Burns, empero. A pesar del mito del "genio rudo", el poeta era un políglota refinado y agasajado, mantenido, por los círculos del Edimburgo chic. Uno

de los contertulios de Burns, harto desaseado, respondía al infortunado nombre de William Smellie, o sea, Guillermo Maloliente. Impávido, al parecer, Smellie se labró un porvenir con consideraciones filosóficas, antigüedades escocesas y una imprenta que estampó la primera *Encyclopedia Britannica*, de tres volúmenes. En 1765 la monografía de Smellie sobre el sexo de las plantas le valió una medalla de oro en algún lado, y en 1781 tradujo y editó una versión en nueve tomos de la obra francesa en 36 volúmenes titulada *Historia Natural*, de Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon (me pregunto lo que pensaría éste de que su traductor se llamara Maloliente). Buffon era paladín de la teoría preevolucionista de la gran cadena de los seres, según la cual todas las formas de vida inorgánicas y orgánicas estaban enlazadas en gradaciones, desde el limo a los ángeles. Por donde las trufas ocupaban un lugar intermedio entre las piedras y las setas.

Los partidarios de Buffon sostuvieron una disputa agria con Thomas Jefferson, a quien sacaron de quicio con sus comentarios sobre una supuesta América asaeteada por la sífilis, llena de ranas ponzoñosas y, sobre todo, patria de una fauna estúpida. La réplica de Jefferson sobre tal curiosa visión zoológica fue enviarles un alce disecado. Por aquel entonces, Jefferson estaba también ocupado informando al presidente James Madison sobre las nuevas cerillas fosforéticas. Que no tuvieron gran éxito hasta que a mediados del siglo XIX los hermanos Lundström patentaron la versión de seguridad que ahora nos resulta familiar. En aquella época, sin embargo, el fósforo se usaba para propósitos más a ras de suelo, tras el hallazgo del químico alemán Justus von Liebig de que los campesinos iban a obtener más fruto de su dinero si echaban algunos minerales al suelo, fosfatos por ejemplo. De un solo golpe, por así decir, resolvió el problema de la alimentación de la pujante población industrial.

El de Liebig fue sin discusión el primer laboratorio de química industrial. Allí aprendió a investigar una generación entera de malabaristas del tubo de ensayo. Entre los que se contaba August von Hofmann, que desembarcó en Inglaterra con los métodos didácticos de Liebig, donde permaneció durante 20 fructíferos años, dirigió el nuevo Colegio Real de Química y sugirió a un joven llamado William Perkin que se sumergiera en el alquitrán del carbón para descubrir la primera tintura de anilina artificial.

Los tintes de anilina produjeron un mundo en technicolor. Excepto el dominio de los libros y los periódicos, donde la tinta de anilina, barata y obtenida en cantidades industriales, ayudó a mantener muchos libros de contabilidad de las imprentas (y sus productos) limpios y en negro. Algunos decenios después, las nuevas tintas de anilina revelaron otra seductora característica. Mezcladas con un disolvente, se secaban rápidamente. Justo lo que cierto húngaro quería para su nuevo bolígrafo.

Y vuelvo a mis garabatos.

LIBROS

Ley y orden

Newton y Linneo

WREN'S "TRACTS" ON ARCHITECTURE AND OTHER WRITINGS, por Lydia M. Soo. Cambridge University Press; Cambridge, 1998. **ISAAC NEWTON. DIE MATHEMATISCHEN PRINZIPIEN DER PHYSIK**. Traducción y anotaciones de Volkmar Schüller. Walter de Gruyter; Berlín, 1999. **ISAAC NEWTON. THE PRINCIPIA. MATHEMATICAL PRINCIPLES OF NATURAL PHILOSOPHY**. Nueva traducción inglesa de I. Bernard Cohen y Anne Whitman, con la ayuda de Julia Budenz, y una guía introductoria de I. Bernard Cohen. University of California Press; Berkeley, 1999.

DIE GESCHICHTE DER MYKOLOGIE, por Heinrich Dörfelt y Heike Heklau. Einhorn-Verlag Eduard Dietenberger GmbH; Schwäbisch Gmünd, 1998. **BOTANIK UND WELTWEITER HANDEL: ZUR BEGRÜNDUNG EINES NATÜRLICHEN SYSTEMS DER PFLANZEN DURCH CARL VON LINNÉ (1707-78)**, por Staffan Müller-Wille. Verlag für Wissenschaft und Bildung; Berlín, 1999. **"QUALITATES VEGETABILIUM", "VIRES MEDICAMENTORUM" UND "OECONOMICUS USUS PLANTARUM" BEI CARL VON LINNÉ (1707-1778)**, por Gerlinde Hövel. Deutscher Apotheker Verlag: Stuttgart, 1999.

NATURE'S ARGONAUT. Daniel Solander 1733-1782, por Edward Duyker. Melbourne University Press; Melbourne, 1999. **LOUIS JURINE. CHIRURGIEN ET NATURALISTE (1751-1819)**. Dirigido por René Sigrist, Vincent Barras y Marc Ratcliff. George Éditeur; Ginebra, 1999.

Sobre los puentes tendidos por Christopher Wren cruzó la ciencia moderna. Cuestionó los principios del Renacimiento, absorbió las nuevas técnicas francesas y creó doctrina propia en unos esbozos que Lydia M. Soo ha reunido y estampado en *Wren´s "Tracts" on Architecture and Other Writings*. En sus páginas se mezclan la abstracción del teórico que fue, así en los *Tratados*, con el realismo del que lleva largos años a pie de obra, en la "Carta a un amigo sobre la comisión para construir cincuenta nuevas iglesias en la ciudad (Londres)" o en el "Informe sobre la abadía de Westminster".

Centra el pentatratado, que arranca con una meditación sobre la belleza, en los órdenes arquitectónicos clásicos, al tiempo que reformula las técnicas contemporáneas fundándose en los métodos de la ciencia del siglo XVII. Da la réplica a un viejo sistema bicentenario, el establecido por Leon Battista Alberti en su *De re aedificatoria*. Sirviéndose del recuperado Vitrubio y recorriendo ruinas y vestigios de la Roma gloriosa, Alberti dicta los cánones de la arquitectura del Renacimiento: proporción, utilidad y consistencia.

Durante ocho meses, entre 1665 y 1666, Wren estuvo en París. Frecuenta allí las tertulias de Henri Justel, el abate Bourdelot, Melchisédec Thévenot y Adrien Auzout, y, sobre todo, visita sus espléndidas iglesias góticas, el Louvre en construcción y el domo del Colegio de las Cuatro Naciones. Le valdrá de mucho ese conocimiento directo en la restauración de las iglesias medievales de san Pablo, la catedral de Salisbury y la abadía de Westminster, arrasadas por el fuego de septiembre de 1666. Presentaba la primera dos graves problemas estructurales: el pandeo exterior de los muros, en razón del encastre incorrecto en el techo, y el angostamiento del crucero.

Miembro fundador de la Regia Sociedad, introduce en sus anteproyectos los principios de la estática. Considera la arquitectura un arte mecánico que pone brida a la naturaleza, la moldea. Es, también, ciencia matemática. Wren hizo especial hincapié en el emplazamiento de los templos y en su adaptación a las exigencias de la comunidad. En el emplazamiento primaba la densidad de población sobre los espacios más baratos de los suburbios. Sin obsesionarse por la tradicional orientación este-oeste, defendía una fachada porticada que debía sobresalir del entorno por la espira característica; el resto, plano. La planta podía ser de nave única o de crucero central con naves laterales. Colocaba el altar en el extremo oriental con la puerta de entrada en el lado opuesto. Para las proporciones de la fachada, recomendaba que la razón de anchura a altura no fuera más de 1/3, en vertical, y no más de 3 a 1 en horizontal.

La historia de la confección de los *Principia* se ha contado innumerables veces. En el verano de 1684, el astrónomo Edmond Halley visitó a Isaac Newton para recabar su ayuda en la resolución de un problema en el que habían tropezado Wren, Robert Hooke y él mismo: hallar la órbita



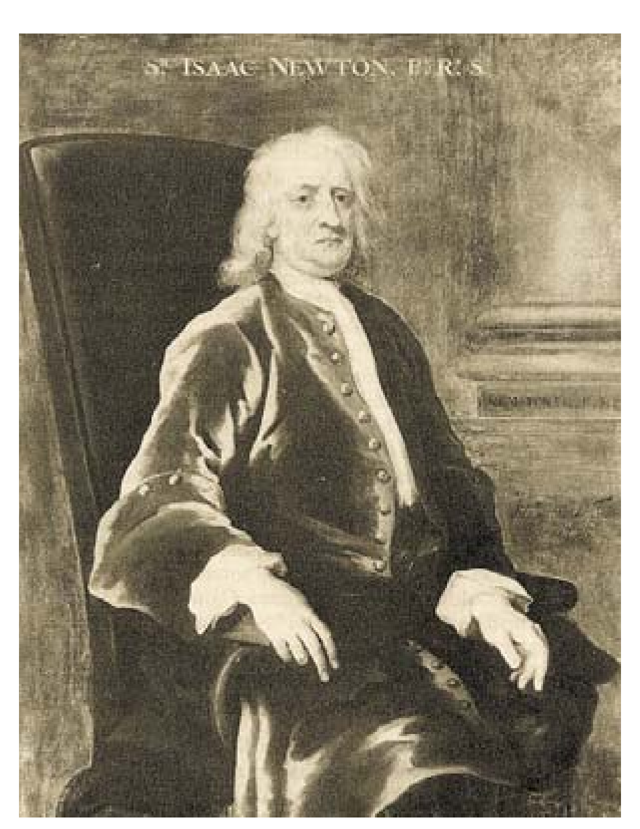
Christ Church, Oxford

planetaria que se describiría con una ley de fuerza central del inverso del cuadrado. Newton sabía que la respuesta era una elipse.

De esa obra cumbre de la ciencia de todos los tiempos acaban de aparecer una nueva versión alemana (*Die Mathematischen Prinzipien der Physik*) y otra en inglés (*Mathematical Principles of Natural Philosophy*). Por culpa de la contemporaneidad de ambas, la de Volkmar Schüller no ha podido disfrutar de la postrera edición de Cohen, y así se basa en una precedente de este experto en el *corpus* newtoniano.

Para resaltar el impacto de los *Principia* en los primeros lectores, Schüller agrega el texto de varias reseñas. (Frente a la relativa frialdad con que se acogió la primera edición, al aparecer la segunda en 1713 se la reputó auténtica *chef d'oeuvre* matemática; la física persistía en el dominio de lo cualitativo, salvo en el nuevo divertimento de las demostraciones experimentales.) Y pese al carácter sumario de las anotaciones, razona la sustitución, en el título, de "Philosophia naturalis" por "Física". En una extensa digresión sobre el significado histórico de la expresión latina, recuerda que la obra newtoniana es un tratado matemático y físico, sin nada que ver con el sentido de la filosofía al uso. La palabra alemana que podría reputarse equivalente, "Naturphilosophie", aparece en la segunda mitad del siglo XVIII y adquiere muy pronto una connotación peculiar en el área germana, que se sale de este contexto. Muy pertinente, el excursus sobre formas substanciales y cualidades ocultas, aquéllas conceptos centrales de la filosofía aristotélico-escolástica y éstas vinculadas, como la propia gravedad newtoniana, al mundo alquimista.

La introducción de Cohen camina por otros derroteros. La guía, así la llama, consta de casi 400 páginas y es una profunda investigación histórico-exegética del texto de los *Principia* y del pensamiento de su autor. La traducción se basa en la tercera edición (1726), la última versión revisada personalmente por Newton, si bien abarca también extractos de las dos ediciones precedentes.



Newton a los 82 años, retratado por John Vanderbank

Los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* aparecieron en 1687. Les siguió en 1713 una edición revisada, y a ésta la tercera, un año antes de la muerte de Newton en 1727. Se trataba, en palabras de su autor, de una "mecánica racional", aunque quizá habría que llamarla con Leibniz "dinámica", pues de las fuerzas y sus clases se ocupa.

Newton consagra el libro primero de los *Principia* a las fuerzas y el movimiento en espacios exentos de resistencia. El segundo, al análisis del movimiento en medios resistentes, el péndulo, las olas y los vórtices. El sistema del mundo, lo que Laplace bautizaría como mecánica celeste, se aborda en el tercer libro.

Estudia de entrada el movimiento de una partícula, de masa unidad. Se había demostrado que el peso era una magnitud variable, dependiente de la latitud terrestre, una propiedad "local" pues, que no valía como magnitud del cuerpo. Por otro lado, los planetas eran centros de fuerza en razón de su materia o masa. Y tras descubrir que las fuerzas interplanetarias atestiguaban la gravedad universal, estableció el doble objetivo de su escrito: mostrar las condiciones bajo las cuales las leyes de Kepler sobre el movimiento de los planetas eran exactas y explorar de qué forma esas leyes tenían que modificarse en el mundo de la naturaleza por las perturbaciones.

No hay conciliación posible, subraya Newton, entre cartesianismo y las tres leyes de Kepler. Pese a ello, debe a Descartes el principio de la fuerza de impulso ejercida sobre un cuerpo en movimiento uniformemente rectilíneo. El concepto de fuerza adquiere en el inglés múltiples facetas. Admite la existencia de fuerzas internas de los cuerpos, ante todo la "vis insita", o "fuerza inherente", y la "vis inertiae", o "fuerza de inercia". Pertenecen al grupo de las fuerzas externas la gravedad, la electricidad, el magnetismo, la presión, el impacto, la fuerza elástica y la resistencia. Característico de las fuerzas externas es que podían cambiar el estado de movimiento o de reposo de un cuerpo; las internas se oponían a tales cambios de estado.

En la presentación de su teoría dejaba de lado, al menos transitoriamente, toda consideración que se alejara de la base matemática de la física. Ese estilo newtoniano, en expresión acuñada por Cohen, analiza la materia (o masa), la fuerza y el propio espacio (en relación con los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y órbitas). Del razonamiento matemático derivaba directamente la universalidad de la fuerza de la gravedad que actúa de acuerdo con la ley del inverso del cuadrado. Nada más alejado en su propósito que fundarse en "opiniones metafísicas".

En el dominio de las ciencias naturales, la figura del XVIII es Carl Linné. Sobre su obra más allá de la mera taxonomía empiezan a defenderse tesis doctorales, que nos descubren las raíces teóricas de su pensamiento sistemático (así Staffan Müller-Wille en *Botanik und weltweiter Handel*) o el interés aplicado de toda su labor (Gerlinde Hövel en "*Qualitates vegetabilium*"...).

Sabido es que menos brillante anduvo Linneo en el mundo de la criptogamia, no obstante su importancia en la historia natural, la alimentación y la medicina. Al sueco se le reprocha, en efecto, que, en su sistemática, incluyera en una sola clase cuantos seres carecían en su opinión de órganos sexuales manifiestos. Aunque

Evolución del darwinismo

Darwinism's Struggle for Survival. Heredity and the Hypothesis of Natural Selection, por Jean Gayon. Cambridge University Press; Cambridge, 1998.

En este libro se analizan en profundidad los problemas con que se enfrentó la hipótesis de la evolución por selección natural, desde su formulación por Darwin hasta que la genética de poblaciones le dio un fundamento sólido. Así, según el autor, se sale al paso de la idea sustentada por muchos oponentes actuales del darwinismo que se presentan como "contrarios a un dogma que nunca había sido cuestionado seriamente por la comunidad científica".

La necesidad del darwinismo de "luchar para sobrevivir" se explica porque "la hipótesis de la selección natural no estaba enraizada con suficiente firmeza en datos empíricos, como Darwin hubiera deseado. En *El origen de las especies* no hay ejemplos comprobados de selección natural y la hipótesis se fundamenta en la variación y la herencia, que en términos de sus mecanismos fisiológicos entonces eran misteriosas". En consecuencia la teoría seleccionista tuvo que superar tres dificultades principales: la sospecha de que se trataba de un principio *ad hoc*, el obstáculo de hacerse compatible con la herencia y el problema fundamental de presentar alguna prueba experimental de selección natural.

La dificultad de que la selección natural sea compatible con la herencia es el tema central del libro. En el primer capítulo, donde se comparan las ideas, no coincidentes, de Darwin y de Wallace sobre la selección natural, se señala la importancia que da Darwin a la herencia, a diferencia de Wallace. En Darwin la herencia resulta fundamental para que sea posible la evolución por selección natural; sitúa la herencia en el centro de la problemática biológica.

Aborda las críticas de Jenkin, de Galton y de los primeros investigadores del mendelismo. La principal objeción de Jenkin fue que la selección natural no puede modificar los valores medios de los caracteres de una especie, si la herencia se transmite por líquidos. A esto respondió Darwin con la teoría de la pangénesis, incorporando el lamarckismo en su teoría, aunque manteniendo un papel para la selección natural. Galton descubrió que el valor medio de los caracteres cuantitativos en los descendientes se desvía del de sus progenitores y se aproxima al de la

ese capítulo debiera reescribirse tras la aparición de *Die Geschichte der Mykologie*.

Con reminiscencias medievales, la botánica renaciente agrupa esos organismos en razón de su afinidad externa: "Fungi", "Amanitae", "Boleti", "Tuberi". Bock llegó a identificar, en el primer tercio del XVI, los hoy llamados *Morcella esculenta*, *Agaricus campestris*, *Lactarius vellerus*, *Cantharellus cibarius*, *Ramaria* sp. y alguno más. Transcurridos varios decenios, Cesalpino y Clusius inician la tendencia sistemática. Aquél los agrupa en razón de su forma y lugar de florecimiento. Clusius los reparte entre "fungi esculenti" (21 géneros o tipos) y "fungi perniciales" (26 géneros).

Las floras locales de la segunda mitad del XVII anotan las variedades endémicas. Hoffmann, por ejemplo, reconoce hasta 40 estirpes de "Fungi". Franciscus van Sterbeeck escribe en 1675 un *Theatrum fungorum* con más de 250 estirpes. Atento a la morfología John Ray distribuye más tarde los hongos entre portadores y carentes de talo. Aclara un tanto el panorama quien durante todo un siglo será principal rival de Linneo, el francés Tournefort; afirma éste que los hongos pertenecen con musgos y algas al grupo de plantas sin flores ni semillas visibles. Y crea siete géneros de hongos: "Agaricus", "Boletus", "Coralloides", "Fangoides", "Fungus", "Lycoperdon" y "Tubera".



Representación del género Fungus, *según P. A. Micheli (1729)*

Linneo tomó de Tournefort la clasificación de los hongos en géneros. Pero él aporta un criterio básico, el de la sexualidad.

¿Era éste un criterio meramente utilitarista? ¿Había tras su sistema alguna base teórica? Linneo inició su formación médica en la Universidad de Lund en 1727. Investigó aquí la nueva teoría propuesta por Sébastien Vaillant sobre la existencia de una sexualidad genuina en las plantas. Tras un primer viaje a Laponia, se trasladó a Holanda para graduarse, en 1735, año en que publicó su *Systema naturae*, donde dividía las plantas con flores en clases, que dependían de sus estambres, subdivididas en órdenes, fundados en el número de pistilos. En órdenes se agrupaban los géneros, conjuntos de especies que poseían flores y frutos similares. Linneo, vuelto a Suecia, fue nombrado en 1741 profesor de medicina y botánica en la Universidad de Upsala. Ocho años más tarde introducía la nomenclatura binaria.

Linneo vivió y trabajó rodeado de miles de pliegos de plantas. En ese sentido fue un empírico. Pero había que poner orden en ese maremágnum, idear un sistema. Por eso resulta clave la lectura de su opúsculo epistemológico *Philosophia botanica*. La propia introducción de una estructura jerárquica del sistema supone ya una quiebra con la tradición. Esa quiebra implica la búsqueda de agrupaciones que representen formas. ¿Formas naturales o artificiales?

media general de la población, es decir, presenta “regresión”. De esto concluyó que este efecto anularía el efecto de la selección natural; por eso rechazó el darwinismo. Los primeros mendelianos, influidos por las características de la variabilidad (discontinua) que estudiaban, siguiendo a de Vries aceptaron la teoría mutacionista de la evolución y fueron oponentes convencidos del darwinismo.

La lucha por la supervivencia del darwinismo la lideraron Weismann, Pearson y Johannsen. Weismann refutando la teoría de la pangénesis y, por tanto, el lamarckismo. Pearson, defendiendo la importancia de los caracteres cuantitativos en la evolución frente a los mendelianos. Johannsen, demostrando que la regresión de la media de los hijos se explica por la existencia en los caracteres cuantitativos de variabilidad producida por diferencias en el ambiente, además de variabilidad debida a diferencias hereditarias. La variabilidad determinada por el ambiente no se hereda, lo que constituye la causa de la regresión que, por tanto, no indica ausencia de selección natural.

A la supervivencia del darwinismo contribuyó el avance en el conocimiento de las características de la variabilidad individual observada en la naturaleza, que resultaron favorables para la aceptación de la acción de la selección natural. En esta línea trata Gayon del descubrimiento del mimetismo y, en especial, de los trabajos de Weldon y Bumpus. Weldon estudió principalmente la variabilidad en caracteres métricos en poblaciones de crustáceos, en cuyo análisis estadístico colaboró Pearson. Bumpus analizó, en una serie de gorriones muertos a consecuencia de una fuerte tormenta, 10 caracteres métricos (tamaño, peso, longitud del pico, longitud de las alas, etc.), comprobando que correspondían a variantes extremas de las distribuciones correspondientes. No obstante, frecuentemente los pájaros con un solo carácter extremo sobrevivían, pero no lo hizo ningún pájaro con 3 caracteres extremos. Esto le llevó a concluir que la selección natural no actúa independientemente sobre cada carácter, sino sobre un complejo de caracteres, sobre un “tipo”.

La profundidad con que está escrito el libro, no reflejada en la descripción esquemática que acabamos de hacer de su contenido, lo hace recomendable a todos los interesados en el darwinismo y su historia. En mi opinión son muy pocas las objeciones que se le pueden hacer.

ANTONIO PREVOSTI

Desde muy pronto establece que la especie y el género son obras de la naturaleza, la variedad procede del cultivo, en tanto que clases y órdenes resultan de la naturaleza y del arte. Admite, pues, que ningún sistema, ni el suyo siquiera, es genuinamente natural. E impone que el nombre específico de la planta ha de servir para distinguirla de todas sus congéneres, que manifieste su peculiaridad exclusiva. A la hora de describirla, exige detenerse en las partes externas, incluidas las relativas a la fructificación, si bien la descripción cabal se atiene sólo a las partes principales según número, figura, proporción y situación.

Recibe la influencia del iatromecánico Boerhaave en su concepción del organismo. Nunca en el reino mineral se produce generación *ex ovo*, ni hay en ella circulación de humores por los vasos. El cuerpo orgánico, por contra, consta de vasos que portan humores, y la semilla de la planta, mezclada con cierta masa del reino mineral, instruye a los cuerpos que asimila para que se conviertan en algo más noble. Esa asimilación se hace patente en el análisis químico. Toma por modelo los experimentos acometidos en la Academia de Ciencias de París, que muestran los componentes en ácidos, aceites esenciales, “sal fija” y “abundancia de tierra”.

Pero la investigación linneana no pierde de vista lo que en su país es necesidad apremiante, la explotación eficaz de la madera, brea, el hierro y plantas, tendencia que prosiguen Carl Wilhelm Scheele, autor de los primeros ensayos con ácidos orgánicos vegetales, y Friedrich Wilhelm Sertürner, que aisló la morfina del opio.

Cuando Linneo irrumpe en escena persistía la doctrina farmacológica de las cualidades y los grados de tradición galenista para explicar las propiedades (“vires”) de las plantas medicinales. Pero él busca también su aprovechamiento animal (forraje, pastos), e industrial. Por decirlo en la expresión de la época, le preocupa el *usus physicus et chymicus* del vegetal. Con esa perspectiva hemos de entender sus viajes a Graso, Laponia y Dalarna. Sin olvidar la aplicación medicinal inmediata, como corrobora en *Pharmacopoea Holmensis* o en *Materia medica*. Junto al acervo de plantas venenosas (distintas de las comunes cicuta o acónito), va incorporando nuevas drogas oficinales, como *Bryonia alba*, *Cochlearia danica* o *Eryngium maritimum*. La *Flora suecica* constaba en un 20 por ciento de plantas de interés médico y de otro 20 por ciento de interés comercial.

Linneo abrigó durante muchos años la esperanza de que en su cátedra de Upsala y al frente de su escuela le sucediera Daniel Solander, biografiado por Edward Duyker en *Nature's Argonaut*. Un cabo, un grupo de islas de Nueva Zelanda, una gavilla de



Representaciones de “hongos” según P. A. Micheli (1729)



Metrosideros excelsa *recogida por Banks y Solander en Nueva Zelanda*

plantas, dos especies de peces y una de ave eternizan el nombre del primer sueco que dio la vuelta al mundo y lo hizo, además, llevando por bandera el sistema de Linneo.

Solander nació en Pitea Gammelstad el 19 de febrero de 1733. Estudió en la Universidad de Upsala, donde su tío enseñaba derecho sueco y romano. Upsala se había liberado del anquilosamiento que padecían otras universidades europeas. Cinco meses antes de que él empezara la carrera se habían instaurado la cátedra de física experimental y la de química. Solander entró muy pronto en el círculo de Linneo, a quien acompaña en la residencia real de Drottningholm y en el palacio real Ulriksdal; en ambos casos el maestro ordenó y describió las hermosas colecciones del monarca. Así se habituó Solander al etiquetado y redacción de catálogos. Da luego sus primeros pasos como explorador y botánico de campo. A la vuelta de su campaña por Laponia, publicó un sumario de la nueva doctrina, *Caroli Linneii Elementa botanica*.

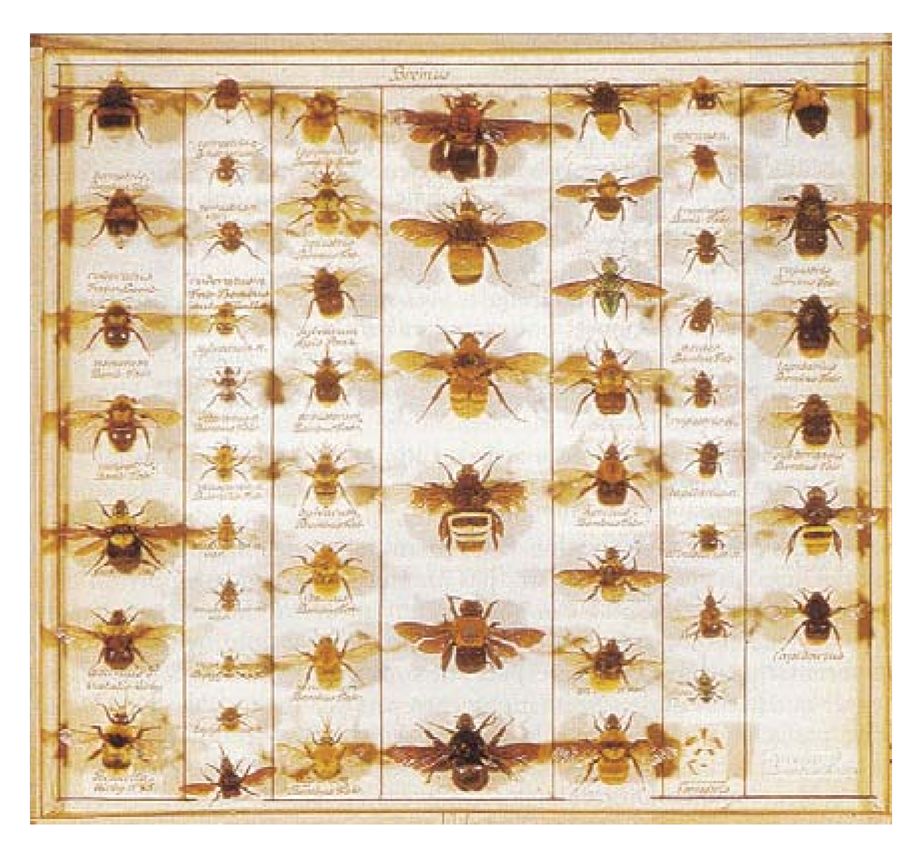
A instancias de un grupo de naturalistas ingleses, deseoso de conocer los principios linneanos y su aplicación, Solander acepta trasladarse a Inglaterra. No fue ni el primero ni el último de los "apóstoles" enviados por Linneo para recoger "muestras de la Creación". Cinco de esos jóvenes científicos morirían por enfermedad o contagio en América del Sur, Indochina, Turquía, Asia Central y Yemen; entre ellos, Pehr Loffling, protegido por la corona española.

Solander llegó a Londres mediado el año 1760. Vio allí las primeras *Magnoliae* en flor de su vida. Sorprendido por la riqueza de los gabinetes y jardines privados envió a Upsala varias remesas de pliegos de *Polypodium taxifolium*, *Melia azedarach, Liriodendron, Magnolia, Hydrangea, Kalmia, Calycanthus, Rhododendron, Hamamelis*, etcétera. Le llama también la atención la abundancia de fósiles en los aledaños de la capital, en particular de *Anomia* (un bivalvo) y *Nautilus* (un cefalópodo).

Pese a los ruegos del maestro, no volvería a Upsala. Y menos cuando en 1763 se le contrata para catalogar las colecciones del Museo Británico, con sueldo y vivienda. Comenzó la tarea con el *hortus siccus* de Sloane, fondos constituidos por 335 volúmenes. Sloane se había hecho con un herbario fabuloso de especies del Cabo de Buena Esperanza. Siguió con el herbario de Paul Hermann, que había herborizado en Ceylan y el Cabo. Acabados los herbarios africanos, acometió la ordenación y etiquetado linneano de las plantas de las Indias Orientales.

De ese modo había adquirido amplia familiaridad con la flora asiática, africana y americana cuando Joseph Banks le invitó a enrolarse en el *Endeavour*, de James Cook. El libro de Duyker es como un diario de navegación donde se anotasen puntillosamente cualquier observación naturalista. Así, los *Mollusca* de toda forma que les acompañan en el primer tramo de la travesía, hasta Madeira, con los especímenes de vegetales y artrópodos recogidos en la isla; novedades no registradas en el catálogo de Sloane era un *Lythrum junceum* y un árbol endémico que dio nombre a un nuevo género, *Heberdenia*. Hasta llegar a Nueva Zelanda y Australia, tras una estancia decepcionante en Brasil. Las notas se van agrupando en cuadernillos: "Plantae Terra del Fuego", "Primitiae Florae Novae Zelandiae", etc. Herborizado el continente australiano, le quedan arrestos para la "Flora Islandica".

Condiscípulo de Solander y brillante alumno de Linneo fue Johan Christian Fabricius, introductor en 1765 de un *Systema entomologiae*, que, reformado más tarde, se convertirá en el clásico de referencia a lo largo de un siglo. En él aprendió sistemática



Himenópteros de la colección Jurine (Museo de Ginebra)

Microscopía aplicada

PLANT MICROTECHNIQUE AND MICROSCOPY, por Steven E. Ruzin. Oxford University Press; Nueva York, 1999.

Las ciencias relacionadas con la microscopía han pasado años obscuros. El uso generalizado del microscopio electrónico, especialmente el de barrido, había en gran parte reemplazado a la microscopía óptica. El microscopio óptico quedó reservado al estudio de la histología, especialmente en los departamentos de patología de los hospitales. Prueba de ello es que, desde los últimos grandes avances en los años cincuenta en materia de tinción y fijación, poco nuevo se había publicado sobre la materia: basta repasar la bibliografía de este libro para apreciar el salto.

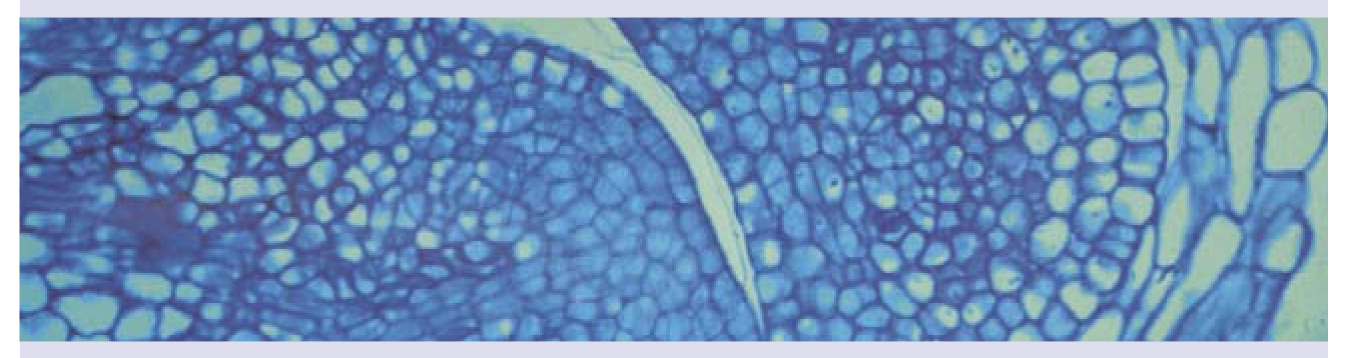
Desde los ochenta, la aplicación generalizada de los métodos moleculares ha vuelto imprescindible dominar la microscopía. Algunas ciencias descriptivas, como la botánica o la zoología, se han transformado en experimentales gracias a la biología molecular. Este manual resalta la localización de los lugares de expresión de los genes mediante marcado. También podríamos mencionar la cuantificación del genoma nuclear o la hibridación *in situ* genómica. Toda esta panoplia de técnicas moleculares exige a los biólogos saber preparar, fijar y teñir una muestra: un conocimiento que no se improvisa. Esa es la razón que, en sus propias palabras, ha movido al autor a escribirlo.

El libro empieza con una guía rápida de ocho técnicas, explicadas esquemáticamente con referencias al texto: la microtomía por impregnación en parafina; los medios acrílicos de inclusión para inmunolocalización e hibridación *in situ*; la técnica de aplastamiento para cromosomas; el ajuste de la iluminación de Köhler, etc. Viene después una actualización breve pero exhaustiva sobre qué es y cómo funciona un microscopio, incluyendo todos los avances de las últimas décadas: desde los sistemas de iluminación y el contraste de fase de Nomarsky hasta el microscopio confocal o la reconstrucción digital de imágenes en tres dimensiones.

El cuerpo central de la obra se extiende del capítulo tercero al duodécimo. En ellos, se explica con detalle las técnicas de fijación, deshidratación de tejidos, impregnación e inclusión de muestras, microtomía y montaje, métodos alternativos de microtomía, métodos especiales (como la maceración de tejidos leñosos para obtener, por ejemplo, secciones de frutos lignificados), tinción, histoquímica y localización de blancos moleculares.

El libro está escrito para estudiantes, aunque muchos lectores agradecemos que las técnicas, sean de microscopía o de cocina, estén explicadas para ignorantes. El libro se completa con varios apéndices, orientados a aspectos prácticos —substancias tóxicas, fórmulas de soluciones tampón— y un último sobre óptica que me parece redundante con el capítulo primero.

ALFONSO SUSANNA



Sección de un tejido de Euphorbia *incluido en metacrilato y teñido con azul de toluidina*

un ginebrino, cuya aportación a las ciencias de la naturaleza se estudia en los trabajos reunidos en la obra *Louis Jurine. Chirurgien et Naturaliste* (*1751-1819*), arquetipo de científico a caballo entre la Ilustración y el Romanticismo.

Jurine, cirujano de profesión, no se limita a cultivar la historia natural por su función subsidiaria en fisiología y terapéutica. Ambiciona conocerla a fondo, en su medio y en la lectura de Swammerdam, Leeuwenhoek, Redi, Réaumur, Lyonet y, sobre todo, Charles Bonnet. Antes de entomólogo fue botánico linneano ("He estudiado con Crantz las Crucíferas y las Umbelíferas, con Haller los líquenes"), geólogo saussureano y mineralista devoto de Romé de l'Isle y Haüy. Se aventuró incluso por el dominio de la ornitología, la ictiología y el estudio de los quirópteros.

En 1796 anuncia que ha acometido la "clasificación de los himenópteros y dípteros" de acuerdo con las nervaduras de las alas, la forma de las mandíbulas y las antenas, caracteres visibles y discretos, sin opción a interpretaciones divergentes. De donde saldrá su decisivo *Nouvelle méthode de classer les Hymenoptères*, que reforman la sistemática de los insectos establecida por Fabricius sobre las partes bucales, en particular en los palpos maxilares y labiales, de donde su denominación de "sistema palpiforme". Para Jurine, el número y la forma de las células radiales y cubitales bastan para agrupar los géneros de himenópteros y dípteros. De los 86 géneros definidos en la *Nouvelle méthode*, 16 son creación suya.

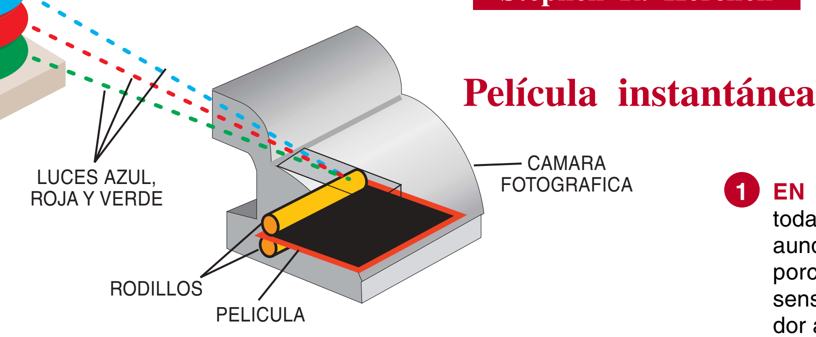
La exhumación histórica de Jurine comenzó cuando los descubridores modernos de la ecolocación de los murciélagos se interesaron por la prehistoria de su hallazgo. En 1794 sostenía que el sentido del oído de los murciélagos podía sustituir al sentido de la vista y dirigir su vuelo en la obscuridad.

LUIS ALONSO

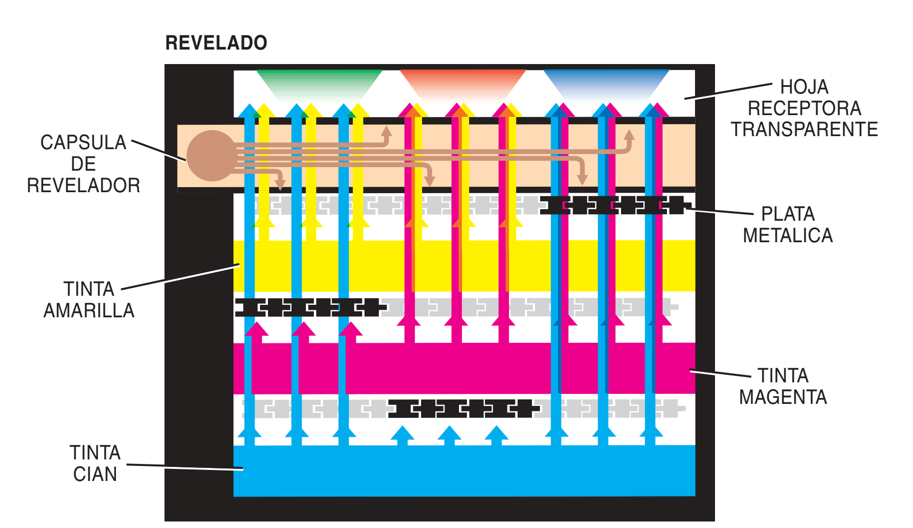
Ideas aplicadas

Stephen R. Herchen

Película instantánea







1 EN UNA PELICULA INSTANTANEA se realizan todas las funciones de un laboratorio de revelado, aunque en una fracción de tiempo y espacio. Cada porción de película tiene tres partes: un negativo sensible a la luz, una cápsula rellena de un revelador alcalino y una hoja receptora transparente. Las longitudes de onda roja, verde y azul penetran en la película hasta que cada una incide en una capa específica del negativo, produciendo diminutos cambios en la composición química de cristales de haluro de plata. La cámara eyecta la película expuesta, haciéndola pasar entre unos rodillos que revientan la cápsula del revelador repartiendo su contenido homogéneamente sobre el fotograma. El revelador contiene un pigmento blanco sobre el cual se asentará la imagen en color final, así como tintes opacificadores que, absorbiendo la luz ambiental, mantienen al negativo en "condiciones de cámara oscura" cuando el mismo se halla fuera de la cámara fotográfica.

2 EL NEGATIVO (compuesto habitualmente de 16 capas de sustancias químicas, cada una de un espesor del orden de una milésima de milímetro) absorbe el revelador, que transforma cristales de haluro de plata en plata metálica. Asimismo, el revelador activa las tintas magenta, cian y amarilla contenidas en otras capas. (Casi todas las fotos en color, instantáneas, diapositivas o normales, usan sólo tres tintas.) Las tintas se desplazan hacia la hoja receptora, aunque a veces permanecen inmóviles. La tinta cian atraviesa las zonas no expuestas de la capa sensible a la luz roja, pero sus interacciones químicas con la plata impiden su paso por donde la capa sensible al rojo haya absorbido luz roja. Las tintas magenta y amarilla, sin embargo, no son afectadas por el revelado argénteo en rojo; se desplazan libremente y se mezclan para crear el rojo al llegar al receptor. Análogamente, en las zonas expuestas a la luz verde se frena el movimiento de la tinta magenta, pero no así las tintas cian y amarilla, que se mezclan para crear el verde. Finalmente, la tinta amarilla, aunque su química es algo distinta, queda bloqueada por la exposición al azul, mientras que las tintas cian y magenta llegan al receptor y crean el azul.

3 A LOS POCOS MINUTOS, una capa del fondo del negativo libera un ácido que desactiva al revelador. Ese ácido, además, convierte en transparentes las tintas opacificadoras contenidas en la hoja receptora, con lo que la imagen puede verse claramente. El agitar la foto mientras se está "secando" no es recomendable: ello sólo puede interferir la distribución regular del revelador y causar defectos en la imagen.



Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA MISION GALILEO A JUPITER Y SATELITES, por Torrence V. Johnson

Nadie esperaba que, con los problemas sufridos, la nave Galileo lograra una inspección tan exhaustiva del sistema de Júpiter. Muy pocos sospechaban su inmensa heterogeneidad.

ORIGENES DEL AUTISMO, por Patricia M. Rodier

La ciencia busca en los genes responsables del desarrollo cerebral la causa última de este trastorno.

MATERIALES DIGITALES Y ENVEJECIMIENTO VIRTUAL, por Julie Dorsey y Pat Hanrahan

Para crear por ordenador imágenes de mayor realismo, habrá que desarrollar mejores modelos de la estructura física de los materiales y de su degradación por el entorno.

CAPTURA DE LOS GASES DE INVERNADERO, por Howard Herzog, Baldur Eliasson y Olav Kaarstad

Sepultar bajo tierra o en el fondo de los océanos el dióxido de carbono podría aliviar algo las preocupaciones sobre el cambio climático.

ANIMALES TRANSPARENTES, por Sönke Johnsen

Ingeniosas adaptaciones fisiológicas han evolucionado para permitir a una imponente variedad de criaturas marinas ser transparentes.

MATEMATICAS Y COSMOLOGIA EN EL RENACIMIENTO, por Víctor Navarro Brotóns

Jerónimo Muñoz intervino, a través de su docencia, observaciones y obra escrita, en el debate astronómico que terminó con el hundimiento de la cosmología tradicional y preparó el terreno para la nueva física de Kepler y Galileo.

DERRETIDO BAJO CERO, por John S. Wettlaufer y J. Greg Dash

De la investigación reciente se desprende que una capa de agua que cubre la superficie del hielo —temperaturas muy por debajo de cero— influye en fenómenos dispares, desde el deslizamiento de un patín hasta la electrización de las nubes tormentosas.

TREPANDO POR EL ARBOL DE LA VIDA, por W. Ford Doolittle

Diez años atrás se diseñaron las líneas básicas de la evolución de los seres vivos modernos. Un esquema que empieza a cuestionarse en varios tramos.

